



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

## A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## THEREMIN

THEREMIN

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Musil

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Vlček

BRNO 2016



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Petr Musil

**ID:** 161835

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

**Theremin**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte principy a funkcionality hudebního nástroje theremin vynálezce Lva Sergejeviče Těrmena. Na jejich základě vypočítejte, navrhnete a sestrojte funkční prototyp. Posloupnost návrhu zapojení a následnou konstrukci důsledně odůvodněte. Důraz dejte i na konstrukční provedení aparátu. Nástroj musí mít možnost doladování a musí obsahovat i ostatní nastavovací prvky pro jeho plnohodnotnou funkcionality a použitelnost. Výstupem bude plně funkční prototyp použitelný jak hudebnímu doprovodu, tak i jako sólo hudební nástroj.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] THEREMIN, L.S. Method of and apparatus for the generation of sounds. Příhl.: 1925-12-05. Patentový spis, US 1661058 A. 1928-02-28. Dostupné také z: <http://www.google.com/patents/US1661058>

[2] VRBA, K. Konstrukce elektronických zařízení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. s. 1-251. ISBN: 978-80-214-4719- 6.

[3] ARCHAMBEAULT, Bruce R. PCB design for real-world EMI control. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002, xvii, 244 s. : il. ; 24 cm. ISBN 1-4020-7130-2.

**Termín zadání:** 1.2.2016

**Termín odevzdání:** 1.6.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Vlček

**Konzultant bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady**

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou konstrukce hudebního nástroje theremin. V teoretické části této práce jsou popsány jednotlivé typy oscilátorů a jejich možné využití při konstrukci tohoto hudebního nástroje. Praktická část práce se zabývá konkrétním návrhem, simulací a konstrukcí obvodu ovládání výšky tónu, obvodu ovládání hlasitosti, směšovače, předzesilovače a stabilizátoru napájení. Princip funkce zařízení je založen na principu směšování dvou VF signálů produkovaných oscilátory v Colpittsově zapojení.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Colpittsův oscilátor, LC rezonanční obvod, oscilátor, směšování, theremin, zázněj

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis focuses on the construction of the musical instrument theremin. Theoretical section of this thesis describes various types of oscillator and its potential use in construction of the musical instrument. Practical section of this thesis deals with specific circuit design, its simulation and construction of pitch control circuit, volume control circuit, mixer, preamplifier and supply voltage regulator. Principle of operation is based on mixing two high frequency signals produced by Colpitts oscillators.

## **KEYWORDS**

beat, Colpitts oscillator, heterodyning, LC resonant circuit, oscillator, theremin

MUSIL, Petr *Theremin*: bakalářská práce. v Brně: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015/2016. 63 s. Vedoucí práce byl Ing. Lukáš Vlček

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Theremin“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

v Brně .....

.....  
podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Lukáši Vlčkovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

v Brně .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

v Brně .....

.....  
podpis autora

# OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Úvod</b>  | <b>10</b> |
| <b>1 Teoretická část bakalářské práce</b>                          | <b>11</b> |
| 1.1 Vynálezce thereminu . . . . .                                  | 11        |
| 1.2 Výskyt v hudbě . . . . .                                       | 13        |
| 1.3 Princip hry na theremin . . . . .                              | 14        |
| 1.4 Funkční bloky . . . . .  | 14        |
| 1.5 Oscilátory . . . . .   | 15        |
| 1.5.1 Typy oscilátorů . . . . .                                    | 17        |
| 1.5.2 Směšování . . . . .  | 24        |
| <b>2 Výsledky bakalářské práce</b>                                 | <b>26</b> |
| 2.1 Funkční blok ovládání výšky tónu . . . . .                     | 26        |
| 2.1.1 Laditelný oscilátor . . . . .                                | 26        |
| 2.1.2 Referenční oscilátor . . . . .                               | 30        |
| 2.2 Směšovač . . . . .   | 31        |
| 2.3 Funkční blok ovládání hlasitosti tónu . . . . .                | 31        |
| 2.3.1 Referenční oscilátor . . . . .                               | 32        |
| 2.3.2 Paralelní rezonanční obvod . . . . .                         | 33        |
| 2.3.3 Převodník frekvence na napětí a útlumový člen řízený napětím | 35        |
| 2.4 Předzesilovač . . . . .  | 35        |
| 2.5 Stabilizace vstupního napájení . . . . .                       | 37        |
| 2.5.1 Návrh zapojení stabilizátoru . . . . .                       | 38        |
| 2.6 Simulace chování obvodu v programu LTspice IV . . . . .        | 39        |
| <b>3 Konstrukce DPS</b>  | <b>42</b> |
| 3.1 Konstrukce thereminu . . . . .                                 | 43        |
| 3.2 Antény - kapacitní snímače . . . . .                           | 43        |
| 3.3 Základní nastavení thereminu . . . . .                         | 44        |
| 3.4 Výsledky měření . . . . .                                      | 45        |
| <b>4 Závěr</b>   | <b>47</b> |
| <b>Literatura</b>  | <b>49</b> |
| <b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>                            | <b>51</b> |
| <b>Seznam příloh</b>   | <b>52</b> |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| A Schémata zapojení funkčních bloků   | 53 |
| B Podklady pro výrobu DPS             | 57 |
| C Fotografie zkonstruovaného zařízení | 60 |
| D Obsah přiloženého CD                | 63 |



# SEZNAM OBRÁZKŮ

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Blokové schéma thereminu . . . . .   | 15 |
| 1.2  | Blokové schéma dvoubodového oscilátoru . . . . .   | 18 |
| 1.3  | Blokové schéma zpětnovazebního oscilátoru . . . . .  | 19 |
| 1.4  | Blokové schéma třibodového zpětnovazebního oscilátoru . . . . .                            | 19 |
| 1.5  | Zjednodušené schéma Hartleyova oscilátoru . . . . .  | 20 |
| 1.6  | Zjednodušené schéma Colpittsova oscilátoru . . . . .                                       | 21 |
| 1.7  | Zjednodušené schéma Clappova oscilátoru . . . . .  | 22 |
| 1.8  | Zjednodušené schéma Vackářova oscilátoru . . . . .   | 22 |
| 1.9  | Ekvivalentní obvodový model krystalu pro okolí základní rezonance .                        | 23 |
| 2.1  | Schéma laditelného Colpittsova oscilátoru . . . . .  | 27 |
| 2.2  | Schéma referenčního Colpittsova oscilátoru . . . . .                                       | 31 |
| 2.3  | Schéma směšovače . . . . .   | 32 |
| 2.4  | Schéma referenčního oscilátoru obvodu ovládání hlasitosti . . . . .                        | 33 |
| 2.5  | Schéma převodníku frekvence na napětí a útlumového článku řízeného<br>napětím . . . . .    | 36 |
| 2.6  | Schéma předzesilovače ve třídě AB . . . . .  | 37 |
| 2.7  | Schéma zapojení stabilizátoru LP2951 . . . . .   | 38 |
| 2.8  | Výstup kolektoru referenčního a laditelného oscilátoru. . . . .                            | 40 |
| 2.9  | Spojený průběh napětí báze tranzistoru . . . . .   | 40 |
| 2.10 | Detail obálky napětí báze tranzistoru s VF složkou a zřetelnými zázněji                    | 41 |
| 2.11 | Průběh výstupního napětí směšovače . . . . .   | 41 |
| 3.1  | Průběh frekvenční odezvy thereminu v závislosti na vzdálenosti ruky<br>od antény . . . . . | 45 |
| 3.2  | Průběh výstupního napětí OOH v závislosti na vzdálenosti ruky od<br>antény . . . . .       | 46 |
| A.1  | Schéma zapojení stabilizátoru vstupního napájení . . . . .                                 | 53 |
| A.2  | Schéma zapojení předzesilovače . . . . .   | 54 |
| A.3  | Schéma zapojení OVT . . . . .  | 55 |
| A.4  | Schéma zapojení OOH . . . . .  | 56 |
| B.1  | DPS vrstva top . . . . .   | 57 |
| B.2  | DPS vrstva bottom . . . . .  | 58 |
| B.3  | Rozmístění součástek ve vrstvě top . . . . .   | 59 |
| C.1  | Theremin v připraveném stavu ke hře . . . . .  | 60 |
| C.2  | Pohled na čelní desku s ovládacími prvky . . . . .   | 61 |
| C.3  | Pohled na zadní desku s konektory . . . . .  | 61 |
| C.4  | Pohled na složený theremin . . . . .   | 62 |
| C.5  | Vnitřní prostor thereminu s úchyty pro uložení antény . . . . .                            | 62 |

# ÚVOD

Theremin je hudební nástroj, který byl navržen a zkonstruován ruským fyzikem L. Těrmem. Tento atypický hudební nástroj je ve své podstatě první v linii elektronických hudebních nástrojů. První model thereminu, v té době pod názvem etherphone, byl představen roku 1929 v ruském Sankt-Petěrburgu. Jeho vznik byl iniciován poznatky Těrmena při vývoji elektronického alarmu. Těrmen zjistil, že kapacita lidského těla je schopna ovlivňovat frekvenci elektronkového oscilátoru. V průběhu let došlo k postupným úpravám a k vylepšování thereminu, zvětšoval se rozsah tónů, citlivost a inovovala se zapojení.

V teoretickém rozboru této práce se budu zabývat vhodností použití jednotlivých typů oscilátorů. Mnou navržený theremin bude principem své funkce vycházet z Těrmenova návrhu z roku 1929, avšak složitá a dnes již zastaralá technologie elektronek bude nahrazena tranzistorovým zapojením, které je podstatně menší, levnější, nevyžaduje vysoké napětí a je přenosnější.

V praktické části této práce bude navrženo vhodné obvodové zapojení a vypočítány hodnoty obvodových prvků. Obvod bude podroben simulaci a na základě těchto poznatků dojde k výrobě prototypu tohoto zařízení.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## 1.1 Vynálezce thereminu

Lev Sergejevič Těrmen se narodil 15. srpna 1896 v Sankt-Petěrburgu. Již od útlého věku byl velmi fascinován vědou a věnoval se také hře na violoncello. V průběhu Těrmenova dospívání došlo v carském Rusku k radikální změně. V roce 1917 proběhl převrat a k moci se dostala levice. Rusko tím ukončilo svoji vojenskou aktivitu v rámci 1. světové války. Hlavními centry revoluční éry byla Moskva a Sankt-Petěrburg, kde mladý Těrmen právě dospíval. Rusko se tak stalo rovnostářskou společností, které se otevřela cesta k novým možnostem. Těrmen studoval fyziku a astronomii na univerzitě v Sankt-Petěrburgu, během války sloužil v armádě jako podporučík radiotechnického pluku. Po válce vyučoval elektrotechniku na vojenské škole v Sankt-Petěrburgu a také pokračoval ve studiu hry na violoncello na konzervatoři.

V roce 1920 se stal vedoucím experimentální elektronicko-oscilační laboratoře na Institutu fyzikálního inženýrství v Sankt-Petěrburgu. Těrmen byl velmi zaujat možnostmi využití elektronek a jejich vývojem. Pracoval na vládním projektu alarmu, který využíval rádiové technologie. Když se osoba nacházela v blízkosti snímače, alarm se spustil. Alarm fungoval na principu dvojice sinusových oscilátorů, která pracovala na principu směřování dvou signálů s velmi podobnou frekvencí, z nichž se jeden rozlaďoval přítomností osoby v okolí snímače alarmu. Právě z těchto poznatků vycházel Těrmen při svých prvních pokusech při tvorbě hudebního nástroje, který kombinací horizontální a vertikální antény mohl ovládat velký rozsah tónů jednoduchým pohybem ruky s citlivostí, která byla mnohem větší než jakýkoliv hudební nástroj té doby.

Těrmen pojmenoval tento monofonní hudební nástroj „etherphon“ [18], protože se při pohybech ruky zdálo, že zvuk vychází pouze ze vzduchu. V roce 1922 předvedl etherphone tehdejšímu předsedovi vlády Vladimíru Iljiči Leninovi v Kremle a vzápětí dal Leninovi jeden z prvních etherphonů darem. V té době zařízení sklídilo poměrně malý úspěch navzdory post-revolucionářské modernizační horečce. Roku 1924 se Těrmen zúčastnil v Sankt-Petěrburgu prvního vystoupení s filharmonii se svým etherphonem, poté začal být přezdíván sovětským Edisonem a byl podpořen v dalším výzkumu. V té době pracoval na pokročilé technologii elektronek, které byly klíčovým prvkem ve vývoji televizí a v roce 1926 se zúčastnil ukázky na Leningradském Polytechnickém Institutu prvního přenosu dynamického obrazu na obrazovku.

V. I. Lenin chtěl předvést světu pokroky, kterých ruští vědci dosáhli a vyslal Těrmena s etherphonem na mezinárodní turné. Do západní Evropy dorazil v létě

roku 1927, předváděl ukázky hry a sám vyučoval hře na etherphon v Berlíně, Paříži a Londýně. V Berlíně se představení zúčastnil i Albert Einstein, který pro New York Times řekl: „Slyšet etherphone pro mne byla taková zkušenost jako pro pračlověka, když poprvé uslyšel zvuk, který vydává napnutá struna (tětiva luku)“. Po představení v Londýnském Albert Hall bylo v Times of London napsáno: „Zejména překvapující byl experiment, ve kterém ozvěna série tónů z etherphonu přicházela ze vzdálenějšího konce Albert Hall. Po tomto experimentu následovalo představení, kdy se zhasla světla v Albert Hall a vynálezce demonstroval hru na etherphone, při které se měnila barva speciální elektrické lampy v závislosti na změně výšky tónu. Barva vyzařovaného světla se měnila z temně rudé přes variace barev spektra až po jasně modrou tak, jak se tóny měnily v rozsahu.“ [9]

Těrmén přijíždí do New Yorku před Vánocemi roku 1927, při rozhovoru s novinářem je popisován jako skromný až téměř nesmělý fyzik a ne jako světoznámý vynálezce. V tomto rozhovoru také samotný Těrmén říká: „Samozřejmě, že věřím, že dojde k hromadné výrobě tohoto hudebního nástroje ve Spojených státech, nejsem však dostatečně starý na to, abych se zajímal o peníze, které by mi to mohlo vydělat. Více se zajímám o představení svého hudebního objevu a věřím, že obstojím v testu hudebních preferencí amerického lidu.“ Ve Spojených státech vystupuje pod jménem Léon Theremin. Po prvním veřejném vystoupení ve Spojených státech v roce 1928 hudební skladatel Waldemar Kaempffert poznamenal: „Hudební orchestr budoucnosti se bude skládat z hudebních nástrojů, na které se bude hrát pohybem ruky. Hudební nástroj theremin dalece převyšuje klavír, housle, či jakýkoliv jiný hudební nástroj. Ve svém hudebním projevu může být srovnáván pouze se zpíváním nebo pískáním, klavírista či houslista nikdy nedokáže dosáhnout nenucenosti ptáčího zpěvu nebo hlasu operní primadony. Co může být volnějšího ve svém projevu než nádherný zvuk vytvořený pouhým pohybem ruky ve volném prostoru?“ [9]

Po úspěchu, který theremin sklidil, se Těrmén rozhodl zůstat ve Spojených státech. Potkává zde ruskou emigrantku a proslulou houslistku Kláru Rockmorovou, kterou začal vyučovat hře na theremin. Záhy se Klára Rockmorová stala velmi známou thereministkou stejně jako další Američanka Lucie Bigelow Rosen. V roce 1929 získal theremin patent a byl licencován u firmy RCA pro hromadnou výrobu. Reklamní kampaň firmy RCA zněla: „Není to rádio, není to phonograf. Je to něco zcela jiného než jste doposud slyšeli!“. Thereminů firmy RCA byly vyrobeny tisíce, avšak po propadů akcí v říjnu 1929 byl obchod s jakýmkoliv luxusním zbožím značně omezen. Těrmén však nadále pokračoval ve své práci a roku 1931 ve spolupráci s Henry Cowellem vytváří rhytmicon – první elektronický bicí (rytmický) nástroj. Následující rok již světu představuje svůj další objev - terpsitone, platformu, na které tanečník svými pohyby vytvářel zvuky podobně jako je tomu u thereminu, avšak celým svým tělem. Těrmén v této době také vytváří první elektronický bezpečnostní systém pro

věznici Sing Sing v blízkosti New Yorku.

V roce 1938 je za zvláštních okolností Těrmen unesen sovětskými agenty. Je obviněn z proti-ruské propagandy a je uvržen do Magadanského pracovního tábora na Sibiři. Odtud je dále přemístěn do Lubyanky, velitelství KGB v Moskvě, kde pracuje na prvním odposlouchávacím zařízení pro špionáž v rámci 2. světové války - Buran. Roku 1947 je propuštěn a oceněn Stalinovou cenou za práci, ale už nikdy nezažívá takovou slávu jako před válkou. Stává se profesorem akustiky na Moskevské konzervatoři, ale je záhy vyloučen za práci na svých elektronických hudebních nástrojích. Pro New York Times to s odstupem času odůvodnil slovy: „Bylo mi řečeno, že elektřina je vhodná k usmrcování zajatců, ne ke tvorbě hudby.“[9] Těrmen v 70. letech začíná s výukou hry na theremin své neteře Lydiye Kaviny, která je jeho posledním žákem, v současné době je to asi nejzkušenější thereministka na světě. Lev Sergejevič Těrmen umírá 3. listopadu 1993 ve věku 97 let, je pochován na Kuncevském hřbitově.

V roce 1995 vychází dokument Theremin: Elektronická odysea. Autory jsou Steven M. Martin a Robert Moog, který je v současné době asi největším producentem hudebního nástroje theremin. Tento film je zaměřen nejen na hudební nástroj theremin, rhythmicon a terpsitone, ale zachycuje i život vynálezce ve Spojených státech, kde se po 55 letech opět setkává s Klárou Rockmorovou v moderním New Yorku (1993) [9].

## 1.2 Výskyt v hudbě

Theremin se svým zvukovým projevem, který se nejčastěji připodobňuje zpěvu ptactva, hlasu operní pěvkyně či zvuku smyčcových nástrojů využívá např. v klasické hudbě. Svým nenapodobitelným tajemným, až strašidelným klouzavým tónem se však hodí i pro filmový doprovod při dramatických scénách, kterým dodává patřičnou atmosféru. Zvuk thereminu je známý i seriálovým nadšencům, ačkoliv si to možná ani neuvědomují. Theremin se vyskytuje ve znělce seriálu Star Trek (1966) či v úvodní znělce série Vraždy v Midsomeru (1997). V moderní hudbě je theremin k slyšení např. u Led Zeppelin (Whole Lotta Love), Beatles (The long and winding road), The Beach Boys (Good Vibrations) nebo Pink Floyd (Echoes). Některé z těchto skladeb byly nahrány electro-thereminem, který však principem své funkce vychází z thereminu.

## 1.3 Princip hry na theremin

Největším rozdílem při hře na theremin oproti konvenčním nástrojům je fakt, že tóny nejsou nijak škálované, jsou tedy typické plynulé přechody mezi tóny (glissando), malá, pravidelná, rychle pulzující změna výšky tónu (vibrato), možné je zahrát i staccato – jednotlivé tóny jsou hrány s velmi výrazným oddělením, tón také obvykle netrvá celou zapsanou délku dané noty.

Do hry na theremin jsou zapojeny obě ruce, pravá ruka ovládá výšku tónu – čím blíže je ruka k anténě výšky tónu, tím vyšší tón theremin produkuje. Levá ruka reguluje hlasitost generovaného tónu - čím blíže k anténě ruka je, tím je hlasitost generovaného tónu nižší.

## 1.4 Funkční bloky

Theremin je svou konstrukcí naprosto jedinečný. Je to v podstatě první elektronický hudební nástroj a zároveň první hudební nástroj, na který se hraje bez jakéhokoli kontaktu. Jeho konstrukce vychází z Těrmenových poznatků [9], kdy kapacita lidského těla je schopna rozladit elektronkový oscilátor. Theremin je tvořen zpravidla skříňkou, ve které jsou uloženy elektronické obvody a dvě antény. Výraz anténa je při konstrukci thereminu nepřesný. Theremin ke změně výšky tónu využívá pouze kapacitních změn antény vůči okolí, nikoliv však elektromagnetických vln, přesnějším výrazem by tedy byl kapacitní snímač. Pro zachování jednoduchosti bude v této práci využíváno výrazu anténa. Pravá anténa se využívá ke změně výšky tónu, levá pak k ovládání hlasitosti generovaného tónu. Nejčastěji spolu antény svírají úhel 90 stupňů, tím je zabráněno ovlivnění výšky tónu levou rukou. Při ovládání hlasitosti se totiž levá ruka pohybuje pouze vertikálně, zjednodušeně tedy můžeme uvažovat, že vzdálenost od antény ovládající výšku tónu a tedy i kapacita levé ruky vůči anténě ovládající výšku tónu zůstává v celém rozsahu konstantní. Anténa výšky tónu (pravá) je poměrně dlouhá a hraje se až v její koncové části právě proto, aby pravá ruka byla mimo akční radius antény hlasitosti.

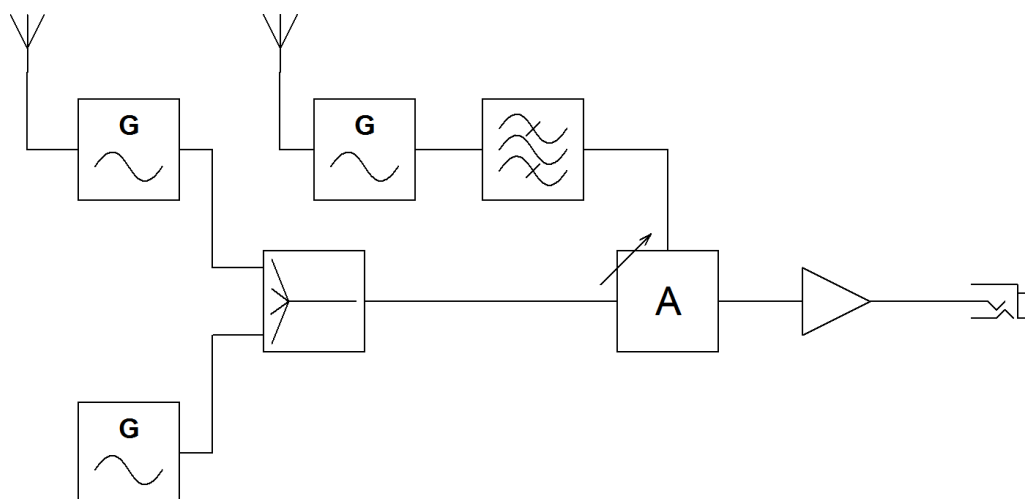
Podstatou thereminu a vzniku tónu je oscilátor, který má ve své zpětné vazbě zavedený kmitavý obvod. Anténa ovládání výšky tónu je připojena do této zpětné vazby a pohybem ruky směrem k anténě se zvětšuje kapacita antény ve zpětné vazbě vůči zemi a rozladuje tento oscilátor. Hodnota kapacity ruky vůči anténě je však pouhých několik jednotek pikofaradů, tudíž změna by byla velmi slabě postřehnutelná.

Při naladění oscilátoru na řádově vyšší frekvence je vliv kapacity ruky podstatně větší, lidské ucho je však limitováno svým rozsahem (20 Hz – 20 kHz). Možnost, jak přesunout tuto změnu frekvence do slyšitelného pásma, poskytuje směšovač, který produkuje signál harmonického průběhu vzniklý smíšením signálů dvou oscilátorů,

z nichž jeden je nastaven na stabilní frekvenci a druhý oscilátor je rozladitelný. Smíšením pak vzniká rozdíl ale i zároveň součet frekvencí těchto dvou oscilátorů. Tóny, které slyšíme z thereminu, jsou pouze rozdílové. Součtové tóny leží mimo frekvenční rozsah lidského ucha [11].

Hudební nástroj theremin se skládá z funkčních bloků uvedených na obrázku 1.1:

- referenční oscilátor výšky tónu,
- laditelný oscilátor výšky tónu,
- referenční oscilátor hlasitosti tónu,
- paralelní rezonanční obvod,
- převodník frekvence na napětí a napětově útlumový článek,
- směšovač (mixer),
- zesilovač signálu,
- obvod napájení.



Obr. 1.1: Blokové schéma thereminu

## 1.5 Oscilátory

Oscilátor je typ elektronického obvodu, který nezpracovává žádný vstupní signál, ale naopak je zdrojem signálu - dvojpól. Základním prvkem elektronického oscilátoru je ve většině případů zesilovač (obvykle tranzistor) se zavedenou zpětnou vazbou [3], [16]. Na základě časového průběhu rozlišujeme oscilátory:

- Harmonické – vytvářejí vysokofrekvenční napětí sinusového průběhu, tedy signál periodicky proměnný.

- Neharmonické – vytvářejí signály nesinusového průběhu, příkladem je např. pilovitý či obdélníkový průběh.

Každý oscilátor musí pro zachování své funkčnosti splňovat amplitudovou a fázovou podmínku. Oscilátor musí na svém výstupu udržovat periodické, nijak netlumené kmity se stabilní amplitudou. Elektronický obvod se bude chovat jako oscilátor pouze za stavu, kdy je splněn vztah mezi napětovým zesílením signálu  $A_u$  a napětovým přenosem  $\beta$  zpětnovazebního řídicího obvodu. Podmínka vzniku periodických kmitů je stanovena ze vztahu pro výpočet zesilovače s kladnou zpětnou vazbou. Zesílení zesilovače vyjádříme:

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} \quad (1.1)$$

Přenos zpětné vazby  $\beta$  vyjádříme:

$$\beta = \frac{U_1}{U_2} \quad (1.2)$$

Celkové zesílení zapojení s kladnou zpětnou vazbou:

$$A_u = \frac{A_u}{1 - \beta A_u} \quad (1.3)$$

Tento vztah je znám jako Blackův vzorec.[16]

Po dosazení za  $A_u$  a  $\beta$  získáme hodnotu celkového zesílení kladné zpětné vazby:

$$A'_u = \frac{\frac{U_2}{U_1}}{1 - \frac{U_1}{U_2} \frac{U_2}{U_1}} = \frac{\frac{U_2}{U_1}}{1 - 1} = \frac{\frac{U_2}{U_1}}{0} = \infty \quad (1.4)$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že zesílení s kladnou zpětnou vazbou roste do nekonečných hodnot, oscilátor by nakmitával stále větší hodnoty. Pro udržení stabilního harmonického signálu na výstupu oscilátoru tedy musí platit dvě podmínky:

- Amplitudová podmínka -  $A_u \beta = 1$ , kde  $A_u$  je napětové zesílení zesilovače a  $\beta$  je napětové zesílení zpětnovazebního obvodu
- Fázová podmínka -  $\varphi_{A_u} + \varphi_{\beta} = 2k\pi$ ,  $k \in (0, 1, 2, \dots)$ , kde  $\varphi_{A_u}$  je fázový posuv tranzistoru,  $\varphi_{\beta}$  je fázový posuv zpětnovazebního obvodu. Z tohoto vztahu vyplývá, že součet fázových posuvů musí být  $k$ -násobkem  $2\pi$ . Při dodržení těchto podmínek je zaručeno generování kmitů harmonického signálu, frekvence je definována vlastnostmi zpětnovazebního obvodu a jeho kvalita je určena parametrem jakosti  $Q$  [3], [16].

## Stabilita výstupní charakteristiky oscilátoru

Parametry, které ovlivňují vlastnosti celého oscilátoru:

- typ zpětnovazebního zapojení,
- typ zapojení zesilovače,



- změna teploty (mění parametry součástek zpětné vazby a posouvá pracovní bod tranzistoru),
- jakost součástek zpětné vazby (parametr jakosti  $Q$ ),
- topologické zapojení celého oscilátoru,
- distribuce napájecího napětí (aplikace filtračních členů),
- nestabilita napájecího napětí (změny napětí posouvají pracovní bod tranzistoru).

### Kvalitativní popis parametrů oscilátoru:

Při analýze chování oscilátoru určujeme následující parametry kvality výstupního signálu:

- Stabilita kmitočtu - vyjadřuje změnu kmitočtu v časové oblasti, vyjadřujeme ji jako největší změnu frekvence  $\Delta f_{\max}$  vůči referenční frekvenci  $f_0$  v časové oblasti  $\Delta t$ . Rozlišujeme stabilitu krátkodobou ( $\Delta t < 1$  s) a stabilitu dlouhodobou ( $\Delta t > 1$  s).
- Přesnost kmitočtu - je stanovena odchylkou  $\Delta f_p$  vůči referenční frekvenci  $\Delta f_0$  v časové oblasti  $\Delta t$ . Střední hodnota frekvence  $f_p$  je stanovena z časového průběhu okamžité frekvence kmitočtu v intervalu  $\Delta t$ . Pomocí hodnot  $f_p$  a  $f_0$  můžeme určit přesnost daného kmitočtu.
- Fázový šum - v praxi se setkáváme se dvěma druhy šumů. Prvním z nich je šum amplitudový. Ten se projevuje náhodnými, rychlými změnami výchylky signálu, tento šum však není pravidelný a v praxi se jeho vliv zanedbává. Druhým typem je šum fázový, který se měří na ofsetové frekvenci  $f_m$ . Fázový šum je měřitelný spektrálním (signálovým) analyzátozem a jeho průběh je patrný ve spektrální charakteristice oscilátoru, kde se projevuje jako rozšíření frekvenční základny signálu [2], [3].

#### 1.5.1 Typy oscilátorů

Tento teoretický rozbor je zaměřen především na porovnání vlastností jednotlivých druhů oscilátoru a jejich význam pro použití při konstrukci hudebního nástroje the-remín.

Oscilátory můžeme dělit podle principu vytvoření rezonance [3]:

- rezonanci určuje sériový či paralelní RC obvod,
- rezonanci určuje sériový či paralelní LC obvod,
- rezonance je docíleno piezoelektrickým krystalem či keramickým rezonátorem.

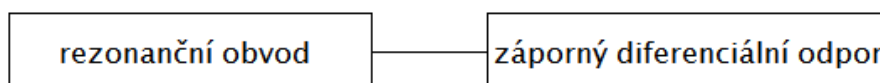
Oscilátory se rozdělují také podle typu zapojení, dělíme je na oscilátory:

- dvoubodové,
- oscilátory využívající zesilovače s kladnou zpětnou vazbou,

- tříbodové oscilátory (zesilovací část a obvod zpětné vazby jsou spojeny ve třech bodech).

### Dvoubodové oscilátory

Dvoubodové oscilátory, někdy označované jako oscilátory se záporným diferenciálním odporem, jsou odvozeny od odtlumení kmitavého obvodu RLC, tedy kompenzací ztrát RLC obvodu, vyrovnáním ekvivalentního činného odporu ( $+R_p$ ) použitím nelineárního rezistoru ( $-R_n$ ), který se vyznačuje zápornou hodnotou diferenciálního odporu v AV charakteristice. V praxi se používají prvky s charakteristikou typu N (tunelová dioda) nebo prvky typu S (dioda lavinová, čtyřvrstvá dioda) [1], [3].



Obr. 1.2: Blokové schéma dvoubodového oscilátoru

V případě, že nebude dodržena podmínka  $R_p = -R_n$  dvoubodového oscilátoru v sériovém zapojení, mohou nastat následující stavy:

$R_p > R_n$  - kmity tohoto dvoubodového oscilátoru budou tlumeny.

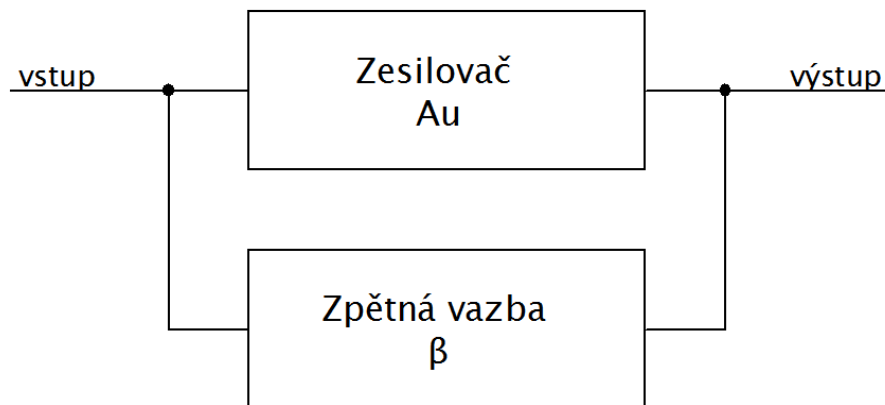
$R_p < R_n$  - kmity tohoto dvoubodového oscilátoru budou narůstat.

### Zpětnovazební oscilátory

Oscilace mohou vznikat v obvodu mimo odtlumení rezonančního obvodu také přivedením kladné zpětné vazby pro zesilovací prvek. Blokové schéma zpětnovazebního oscilátoru je uvedeno na obrázku 1.3. Zesilovacím prvkem může být např. bipolární tranzistor či J-FET tranzistor. Pro správné spuštění zpětnovazebních oscilátorů je nutné, aby součin amplitudové podmínky byl větší než 1, tedy  $A_u\beta > 1$ . V okamžiku spuštění musí být zesílení větší než ztráty v obvodu. Tato podmínka je u zpětnovazebních oscilátorů splněna zavedením automatické regulace zesílení přenosu ve zpětné vazbě. Mezi zástupce zpětnovazebních oscilátorů řadíme: Armstrongův oscilátor, Reinartův oscilátor a Meissnerův oscilátor [1], [16].

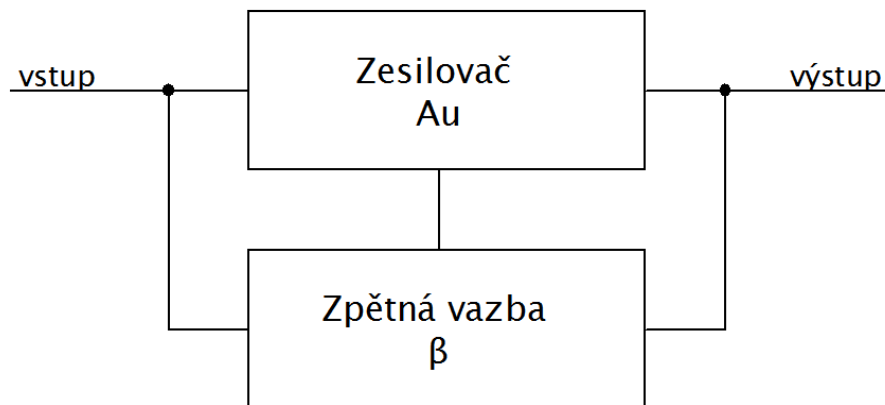
### Tříbodové oscilátory

Tato kategorie oscilátorů je specifická zavedením kladné zpětné vazby, propojení zesilovacího prvku a zpětné vazby je provedeno ve třech bodech. Základním prvkem je zesilovač, nejčastěji bipolární tranzistor v jednom z možných obvodových zapojení: SE (společný emitor), SC (společný kolektor) a SB (společná báze). Pro získání vysoké spektrální čistoty je nutné, aby reaktance zpětnovazebního obvodu měly



Obr. 1.3: Blokové schéma zpětnovazebního oscilátoru

vysoký činitel jakosti  $Q$ . Tříbodových oscilátorů existuje celá řada, mezi nejznámější obvodové zapojení patří oscilátor: Hartleyův, Colpittsův a Clappův [1], [3], [13].



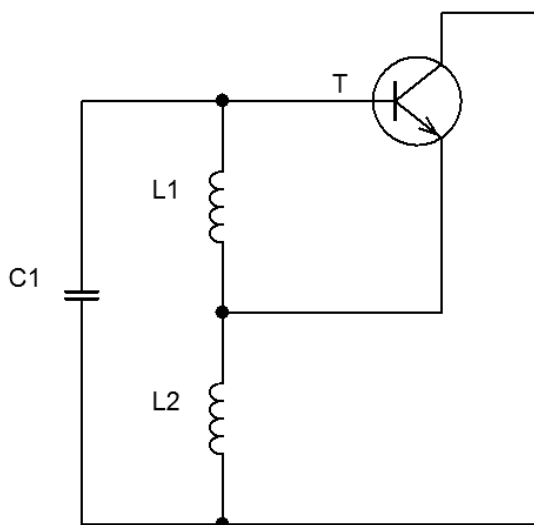
Obr. 1.4: Blokové schéma tříbodového zpětnovazebního oscilátoru

**Hartleyův oscilátor** je základním typem tříbodového oscilátoru. Byl objeven roku 1915 Ralphem Hartleyem. Jednotlivé reaktance zpětnovazebního obvodu tvoří paralelní rezonanční obvod, který má svůj rezonanční kmitočet  $\omega_0$ . Rezananční úhlová frekvence  $\omega_0$  je vyjádřena:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1(L_1 + L_2)}} \quad (1.5)$$

Hartleyův oscilátor je pro volbu v thereminu nevyhovující tím, že reálné cívky vykazují značný posuv hodnot indukčnosti v závislosti na teplotě. Existují cívky, které mají jádro speciálně uzpůsobeno tak, že jejich teplotní závislost není příliš výrazná,

jejich dostupnost je však značně omezená. Mezi jádra s omezenou teplotní závislostí patří např. cívky s resinovou kostrou (materiál phenolic) [1], [3], [16].



Obr. 1.5: Zjednodušené schéma Hartleyova oscilátoru

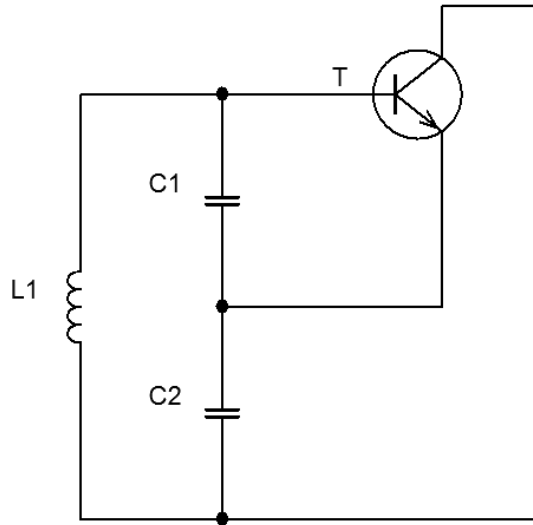
**Colpittsův oscilátor** je druhým základním typem třibodového oscilátoru, reactance zpětnovazebního obvodu spolu opět tvoří paralelní rezonanční kmitočet. Byl objeven v roce 1918 Edwinem H. Colpittsem. Rozdíl oproti Hartleyovu oscilátoru je však v nahrazení indukčního děliče děličem kapacitním a zároveň paralelně připojený kondenzátor je zde nahrazen paralelně připojenou cívkou [13].

Pro rezonanční úhlovou frekvenci  $\omega_0$  platí:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 \left( \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right)}} \quad (1.6)$$

Výhodou tohoto zapojení je, že ve svém zpětnovazebním obvodu využívá pouze jednu cívku. Vhodnou volbou materiálů, ze kterých jsou kondenzátory tvořeny, však můžeme teplotní závislost velmi omezit. Mezi kondenzátory s vynikajícími vlastnostmi v oblasti teplotní závislosti patří kondenzátory slídové nebo keramické kondenzátory vyrobené z materiálu NPO/NP0.

**Clappův oscilátor** byl publikován Jamesem K. Clappem roku 1948. Toto zapojení vyniká svojí kmitočtovou a teplotní stabilitou. Clappův oscilátor vychází z Colpittsova oscilátoru, indukčnost rezonančního obvodu je nahrazena sériovým LC obvodem [3]. Clappův oscilátor 1.7 svojí zpětnou vazbou vhodně eliminuje negativní vliv mezelektrodových kapacit tranzistoru použitím řádově větších hodnot



Obr. 1.6: Zjednodušené schéma Colpittsova oscilátoru

kapacit než hodnoty, které jsou užívány v Colpittsově oscilátoru k dosažení stejné oscilační frekvence. Pro hodnoty kapacit Clappova oscilátoru musí platit:

$$C_2 \gg C_{BE} \qquad C_3 \gg C_{BE} \qquad (1.7)$$

$$C_1 \ll C_2 \qquad C_1 \gg C_3 \qquad (1.8)$$

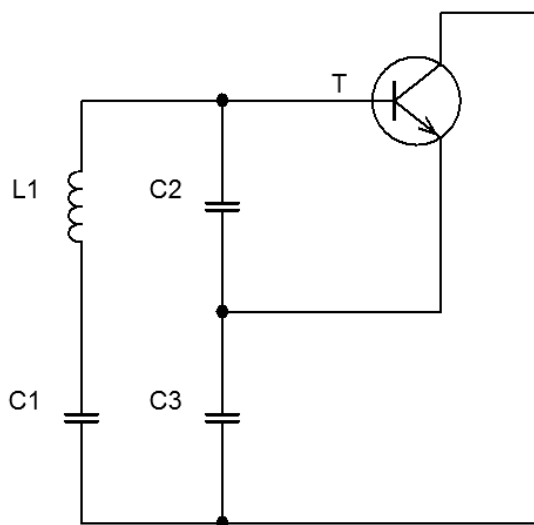
Z vlastností sériového a paralelního LC obvodu můžeme určit výslednou kapacitu  $C$ :

$$C = \frac{C_1 \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}}{C_1 + \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}} = \frac{C_1}{\frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} + 1} \cong C_1 \qquad (1.9)$$

Pro rezonanční úhlovou frekvenci  $\omega_0$  platí:

$$\omega_0 \cong \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \qquad (1.10)$$

**Vackářův oscilátor** je dalším typem VFO, podobně jako např. oscilátor Clappův. Byl publikován Jiřím Vackářem roku 1949. Má lepší vlastnosti než oscilátor Clappův a to zejména v šířce pásma, ve které se dá oscilátor přeladit. Skládá se z elektronky nebo J-FET tranzistoru ve spojení s rezonančním obvodem Colpittsova oscilátoru. Sám Vackář uvádí, že je obvod přeladitelný ve velkém rozsahu. Oscilátor má velmi vysokou stálost frekvence kvůli použití součástek s vysokým činitelem jakosti  $Q$ . Zároveň toto zapojení využívá vhodné závislosti propustné transkonduktance v závislosti na přenášeném kmitočtu. Vackář zjistil, že u Clappova oscilátoru se propustná transkonduktance mění se třetí mocninou kmitočtu, tedy  $\omega^3$ , u Seilerova oscilátoru

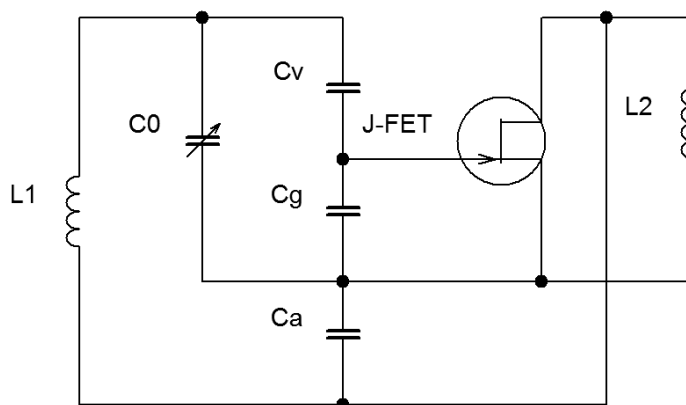


Obr. 1.7: Zjednodušené schéma Clappova oscilátoru

se propustná transkonduktance mění se vztahem  $\frac{1}{\omega}$  a u Vackářova oscilátoru je vztah definován jako  $\frac{\omega}{Q}$ , kde činitel jakosti  $Q$  představuje  $Q$  cívky s hodnotou indukčnosti  $L$  [19]. Tento stav však nastává pouze za splnění následujících podmínek:

$$C_a \gg C_0 \gg C_v; \quad C_g \gg C_v \quad (1.11)$$

Změnou hodnoty kapacity  $C_0$  je možné oscilátor přeladovat.

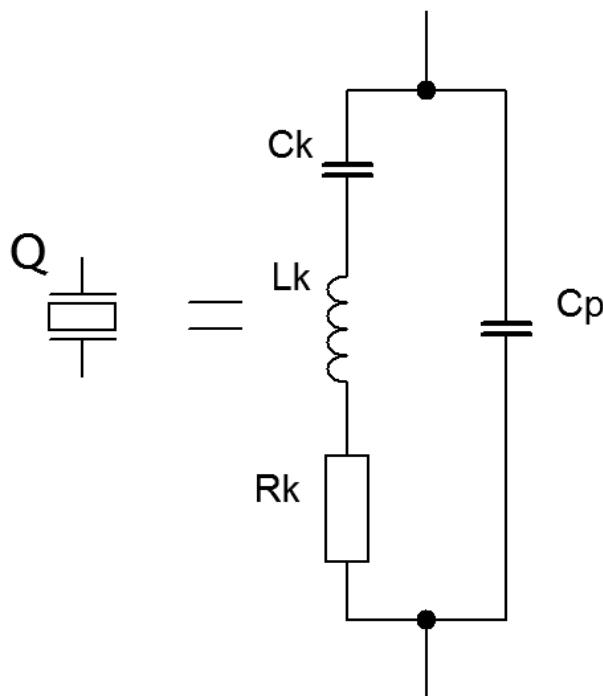


Obr. 1.8: Zjednodušené schéma Vackářova oscilátoru

## Krystalové oscilátory

Krystalové oscilátory bývají často označovány jako oscilátory s piezokrystalovými rezonátory. Krystal je vyroben výbrusem v přesně daných řezech z monokrystalu

křemene či turmalínu. Výbrus tvoří nejčastěji tvar hranolu či kruhové destičky, kde na protilehlé hrany jsou připojeny vodivé elektrody. Výbrus je umístěn v hermeticky uzavřeném pouzdře, ze kterého je odsát vzduch. Ve svém principu využívá piezoelektrického jevu, kdy vlivem mechanického namáhání k tomu vhodného materiálu vzniká na elektrodách elektrické napětí. Tento jev funguje i v obráceném smyslu, přivedením elektrického napětí na tento materiál způsobí jeho deformaci. Přivedením vhodného napětí na elektrody výbrusu krystalu vznikají v celém jeho objemu mechanické kmity a krystal se tedy jeví jako laděný obvod s vysokým činitelem jakosti  $Q$ , řádově  $10^4$  až  $10^6$ . Vyniká také velmi vysokou stálostí kmitočtu  $\Delta f/f = 10^{-5}$  až  $10^{-9}$ . Vyrábí se v hodnotách od jednotek kHz až do hodnot stovky MHz. Frekvence oscilací je závislá na rozměrech a tvaru výbrusu krystalu [3], [16].



Obr. 1.9: Ekvivalentní obvodový model krystalu pro okolí základní rezonance

Zjednodušeným ekvivalentním modelem stanovujeme prvky  $C_k$ ,  $R_k$  a  $L_k$ , které jsou dány mechanickými vlastnostmi rezonátoru a tvoří spolu sériový RLC rezonanční obvod. Kapacita  $C_p$  vyjadřuje kapacity elektrod a kontakt s pouzdrem krystalu. Ve zjednodušeném modelu vykazuje krystal dvě rezonance - sériovou a paralelní.

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k C_k}} \quad (1.12)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k C_{kv}}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C_k}{C_p}} \quad (1.13)$$

Kde  $C_{ekv}$  je kombinací  $C_p$  a  $C_k$

$$C_{ekv} = \frac{C_p C_k}{C_p + C_k} \quad (1.14)$$

Krystalový oscilátor je svými vlastnostmi naprosto ideální pro použití v thereminu, protože vykazuje velmi vysokou jakost  $Q$  a je teplotně stabilní. Jeho největším nedostatkem je však velmi omezená možnost přeladitelnosti. Další nevýhodou je poměrně řídké zastoupení krystalů v oblasti okolo 300 kHz – 1 MHz, do které je vhodné theremin ladit. Krystalový oscilátor je tedy možné použít pouze pro referenční oscilátor, který se již nikterak nepřeladuje. Použití v oscilátoru přeladovaného rukou je tedy vyloučeno.

### Piezokeramický rezonátor

Je vývojově mladší alternativní variantou piezokrystalového rezonátoru. Funguje na stejném principu jako piezokrystalový rezonátor, ale rezonujícím materiálem zde je syntetický piezokeramický rezonátor ze zirkoničitanu olovnatého nebo titaničitanu olovnatého. Jeho výhodou je nižší cena, vykazuje však horší stabilitu v oblasti časové i teplotní. Výhodou pro použití v thereminu by mohl být např. fakt, že ve spektru nižších frekvencí je mnohem dostupnější než piezokrystalový rezonátor, nicméně problém je jeho nestálost a omezení přeladitelnosti na velmi malý rozsah frekvencí.

### 1.5.2 Směšování

Vzhledem k obvyklému naladění frekvencí jednotlivých oscilátorů v thereminu, které se pohybují v rozmezí od 300 kHz do 1 MHz, je nutné zajistit způsob, kterým se produovaný signál přeneseme do slyšitelného pásma, tedy do oblasti 20 Hz – 20 kHz. Jak již bylo uvedeno, kapacitní změna, kterou vyvolá pohyb ruky vůči anténě, je natolik malá, že by v oscilátoru laděném do pásma slyšitelného lidským uchem nevyvolala téměř žádnou změnu. Tento problém je vyřešen použitím směšovače (heterodynu). Ten funguje na principu smíšení dvou frekvencí řádově větších než je požadovaná výsledná frekvence. Tohoto jevu se nejčastěji využívá v přijímacích zařízeních, kde je tato část obvodu označena jako superheterodyn. K samotnému směšování pak dochází na nelineárním či parametrickém obvodu. V matematické interpretaci vyjádříme výchylku harmonického kmitání v čase  $t$  s počáteční amplitudou  $y_m$  a počáteční fází  $\varphi$  pro dvě kmitání:

$$y_1 = y_{m1} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad y_2 = y_{m2} \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (1.15)$$

Součet těchto dvou kmitání zapíšeme jako:

$$y = y_1 + y_2 \quad (1.16)$$



Po dosazení hodnot získáváme následující vztah:

$$y = y_{m1}\sin(\omega_1 t + \varphi_1) + y_{m2}\sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (1.17)$$

Za předpokladu, že počáteční amplituda i počáteční fáze jsou stejné, zjednodušíme tento vztah:

$$y = y_m(\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)) \quad (1.18)$$

Využitím součtových vzorců goniometrických funkcí vyjádříme:

$$y = 2y_m \cos \frac{t(\omega_2 - \omega_1)}{2} \sin \frac{t(\omega_1 + \omega_2)}{2} \quad (1.19)$$

Budeme-li vycházet z předpokladu, že:

$$\omega_1 + \omega_2 \cong 2\omega_1 \quad (1.20)$$

a zároveň, že:

$$\omega_1 + \omega_2 \gg \omega_2 - \omega_1 \quad (1.21)$$

Získáme zjednodušený tvar:

Srovnáním vztahu 1.19 s matematickým popisem kmitání harmonického oscilátoru zjistíme, že část vztahu

$$2y_m \cos \frac{t(\omega_2 - \omega_1)}{2}$$

můžeme považovat za amplitudu složeného kmitání. Tato část vztahu však není konstantní, tedy nebude konstantní ani amplituda. Když tato část vztahu nabývá hodnoty jedna, jedná se o konstruktivní interferenci. V případě, že nabývá nulové hodnoty, mluvíme o destruktivní interferenci. Ta bude závislá na úhlové frekvenci

$$\omega_a = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \quad (1.22)$$

a zároveň tedy i na frekvenci

$$f_a = \frac{f_1 - f_2}{2} \quad (1.23)$$

Frekvence, se kterou vznikají rázy 2.10 (zázněje) jsou maximem intenzity. Vzhledem k faktu, že během jedné periody dosáhne složené kmitání dvakrát své maximální amplitudy, frekvence rázů (záznějů) tudíž bude dvojnásobná:

$$f_r = 2f_a = f_1 - f_2 \quad (1.24)$$

## 2 VÝSLEDKY BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tato praktická část bakalářské práce se zabývá návrhem jednotlivých funkčních bloků popsaných na obrázku 1.1.

### 2.1 Funkční blok ovládání výšky tónu

Funkční blok ovládání výšky tónu se skládá ze dvou oscilátorů - laditelného 2.1.1 a referenčního 2.1.2.

#### 2.1.1 Laditelný oscilátor

Tento funkční blok se skládá ze dvou oscilátorů, z nichž jeden je naladěn na pevnou (referenční) frekvenci, druhý oscilátor je laditelný. Jeho rozsah je definován změnou kapacity ruky vůči anténě a volbou hodnot prvků zpětné vazby.

Na začátku celého návrhu je nutné vybrat vhodné zapojení oscilátoru.

Dvoubodové oscilátory jsou poměrně jednoduché počtem součástek, jejich nevýhodou však je nižší stabilita. Z tohoto pohledu jsou výhodnější volbou oscilátory zpětnovazební.

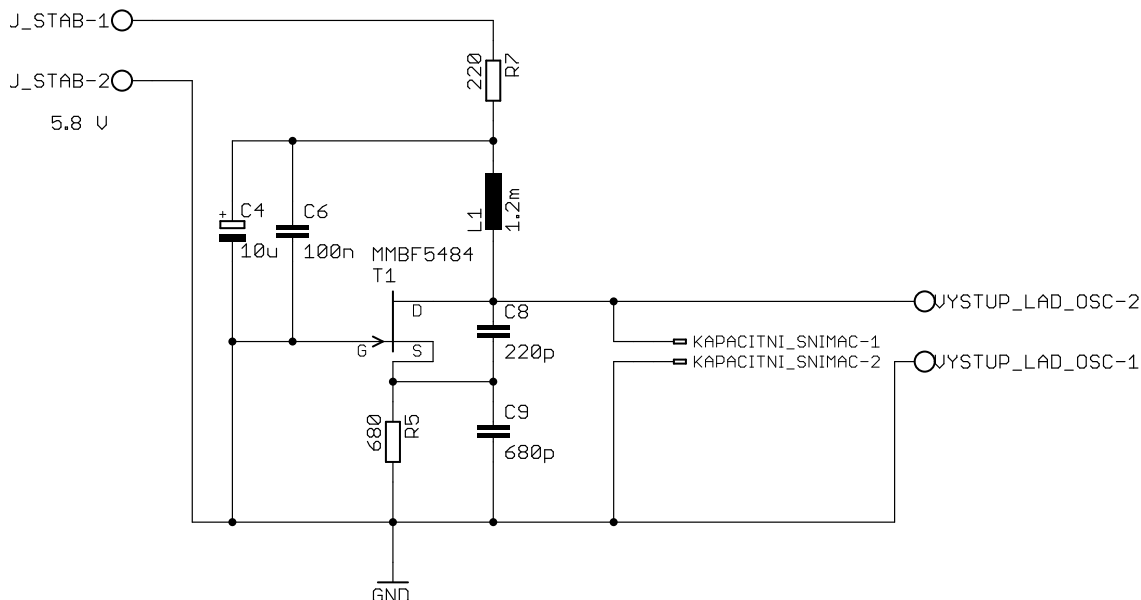
Zpětnovazební oscilátory jsou již stabilnější, ve svém zapojení ale vyžadují použití induktivních součástek - cívek nebo transformátorů, které mj. vytváří elektromagnetické pole, které může způsobovat vazbu s dalšími obvody thereminu.

Naprosto nejvhodnější volbou oscilátoru je třibodové zapojení zpětnovazebního oscilátoru 1.4. Nejstabilnějším zapojením v oblasti stability výstupní frekvence jsou jednoznačně zpětnovazební obvody využívající krystalu [1]. Frekvenční stabilita dosahuje hodnot cca  $10^{-6}$  i více. Nevýhodou je omezený výběr krystalů v oblasti 300 kHz až 1 MHz a také velmi malá možnost přeladitelnosti. Vliv kapacity ruky by se na rozladění oscilátoru tedy téměř vůbec neprojevil. Dostupnost keramických rezonátorů v požadované frekvenční oblasti je lepší, dosahují ovšem nižší výstupní stability než krystalové rezonátory.

Pro návrh tohoto thereminu byl vybrán oscilátor ze skupiny třibodových zapojení. Porovnáním vlastností a chování jednotlivých oscilátorů byl výběr zúžen na oscilátor Clappův a Colpittsův. Clappův oscilátor vyniká vysokou stabilitou výstupní frekvence. Tato stabilita je způsobena použitím vyšších hodnot kapacit než využívá Colpittsův oscilátor pro dosažení stejné frekvence. Problém by ovšem nastal, pokud bychom chtěli Clappův oscilátor rozladit. Vzhledem k malé změně kapacity ruky vůči anténě by Clappův oscilátor nebyl rozladován a theremin s využitím Clappova oscilátoru by disponoval pouze velmi malým rozsahem. Pro realizaci thereminu byl

tedy vybrán Colpittsův oscilátor. Jeho stabilita je dostatečná a využitím malých hodnot kapacit je snadno přeladitelný.

Naprostým základem Colpittsova oscilátoru je zesilovací prvek. Pro tento návrh Colpittsova oscilátoru byl zvolen jako zesilovací prvek tranzistor řízený polem (J-FET) v zapojení s uzemněnou řídicí (gate) elektrodou.



Obr. 2.1: Schéma laditelného Colpittsova oscilátoru

### Nastavení pracovního bodu J-FET tranzistoru v zapojení se společnou bází

Jako zesilovací prvek tohoto obvodu byl zvolen N-JFET tranzistor MMBF5484.

Tranzistor řízený polem, v tomto případě N-JFET, je řízen záporným napětím  $V_{GS}$ , tedy napětím mezi elektrodou source a gate. V případě, že je napětí  $V_{GS} = 0$  V je kanál plně otevřen. Se snižující se hodnotou napětí  $V_{GS}$  je kanál postupně uzavírán. Nastavení pracovního bodu tohoto tranzistoru v zapojení s uzemněnou gate elektrodou je provedeno rezistorem  $R_5$ , který určuje proud protékající kanálem tranzistoru. Úbytek napětí na rezistoru  $R_5$  slouží k nastavení pracovního bodu elektrody gate. [7] Vzhledem k faktu, že navrhovaný theremin bude provozován v bateriovém módu, byl určen proud tranzistorem  $I_D = 1,5$  mA [17]. Proud protékající tranzistorem je definován jako:

$$I_D = 1/R_S \quad (2.1)$$

Úpravou předchozího vztahu získáme vztah pro výpočet hodnoty rezistoru:

$$R_S = 1/I_D \quad (2.2)$$

Po dosazení do vztahu vypočteme hodnotu rezistoru:

$$R_S = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-3}} \approx 680\Omega \quad (2.3)$$

Vyšší hodnota rezistoru  $R_S$  zajistí větší rozkmit výstupního signálu, příliš vysoká hodnota by však mohla snížit zatížitelnost výstupu tohoto oscilátoru. Nižší hodnota sníží rozkmit signálu na výstupu oscilátoru a zároveň bude zbytečně odebírat proud z baterie. Paralelní kombinace kondenzátoru  $C_4$  a  $C_6$  slouží k blokování napájecího napětí. Záměrně jsou voleny dva rozdílné kondenzátory: elektrolytický kondenzátor s větší kapacitou (10  $\mu$ F) slouží k blokování nižších frekvencí, keramický kondenzátor s nižší kapacitou (100 nF) slouží k blokování vyšších frekvencí. Tato paralelní kombinace kondenzátorů zajistí lepší impedanční vlastnosti v širším spektru blokováných frekvencí, protože ve spektru signálu se vyskytují dvě impedanční minima [5].

### Zpětnovazební obvod

Zpětnovazební obvod Colpittsova oscilátoru se skládá z cívky  $L_1$  a kapacitního děliče tvořeného kondenzátory  $C_8$  a  $C_9$ . Tato kombinace LC prvků tvoří laděný obvod, který rezonuje na své rezonanční frekvenci. V laditelném oscilátoru obvodu výšky tónu figuruje ještě kapacita antény, která společně s rukou vytváří paralelně připojený kondenzátor. Frekvence kmitání Colpittsova oscilátoru je určena vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.4)$$

Vztah 2.4 je znám jako Thomsonův vztah, kde  $L$  definuje indukčnost cívky a  $C$  je kombinace všech kapacit připojených do zpětné vazby [3]. Největší kapacitu tvoří kapacitní dělič tvořený kondenzátory  $C_8$  a  $C_9$  (stovky pF), dále kapacita antény (v rozmezí desítek pF), kapacita přechodu báze kolektor (téměř zanedbatelná) a samotná kapacita ruky vůči anténě (jednotky pF). Vzhledem k těmto jednotlivým hodnotám kapacit a indukčnosti definujme citlivost, která určuje, jak výraznou změnu způsobí několik jednotek pF na celkovém rozladění laditelného oscilátoru výšky tónu. Přeskálováním vztahu pro výpočet rezonančního kmitočtu na kHz a pF upravíme rovnici rezonančního kmitočtu 2.4 na tvar:

$$f_0 = \frac{159150}{\sqrt{LC}} \quad (2.5)$$

Citlivost je definována jako podíl parciální derivace rezonančního kmitočtu ku parciální derivaci celkové kapacity, kde indukčnost  $L$  považujeme za konstantu:

$$\frac{\partial f_0}{\partial C} \quad [\text{kHz/pF}] \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \frac{159150}{\sqrt{LC}}}{\partial C} = -\frac{79575 \cdot L}{(LC)^{\frac{3}{2}}} = -79575 \cdot \frac{1}{\sqrt{L}} \cdot \frac{1}{\sqrt{C^3}} \quad (2.7)$$

Ze vztahu 2.7 je patrné, že citlivost je nepřímo úměrná druhé odmocnině z třetí mocniny celkové kapacity. Hodnota citlivosti nabývá u různých typů thereminu od  $-0.2$  (theremin Kláry Rockmorové) až po velmi citlivé thereminy s hodnotou citlivosti v rozsahu  $-2$  až  $-4$ . Záporné znaménko citlivosti značí, že s rostoucí kapacitou klesá generovaný kmitočet [15]. Výsledný zvuk thereminu je však rozdílem frekvence laditelného oscilátoru a referenčního, tudíž frekvence výsledného zvuku roste s rostoucí kapacitou, tedy s přiblížením ruky k anténě. Vzhledem k charakteru zpětné vazby Colpittsova oscilátoru je nutné, aby poměr kapacitního děliče  $C_8:C_9$  byl v rozmezí  $1:10$  až  $1:1$ . Pro návrh thereminu uvažujeme střední poměr  $1:3$ . Vzhledem k požadované citlivosti byla vybrána hodnota  $C_8 = 220 \text{ pF}$  a hodnotu  $C_9 = 680 \text{ pF}$ .

Anténa ovšem vykazuje jistou klidovou kapacitu vůči okolí. Uvažujme tedy relativně nízkou hodnotu klidové kapacity  $4 \text{ pF}$ , kterou je nutno k celkové kapacitě přičíst.

Celková kapacita laděného obvodu se pak bude rovnat součtu kapacit připojených do laděného obvodu:

$$C = C_8 + C_9 + C_{antény} \quad (2.8)$$

$$C = \frac{220 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot 680 \cdot 10^{-12} \text{ F}}{220 \cdot 10^{-12} \text{ F} + 680 \cdot 10^{-12} \text{ F}} + 4 \cdot 10^{-12} \text{ F} \doteq 170 \text{ pF} \quad (2.9)$$

Rezananční kmitočet oscilátoru volíme tak, aby ležel ideálně mimo pásmo, ve kterém by mohlo operovat jiné zařízení (AM vysílání, navigace, apod.). Z tohoto důvodu jsem zvolil rezonanční kmitočet na hodnotu  $350 \text{ kHz}$ , kde by podle údajů [6] nemělo být instalováno vysílání příliš výkonného charakteru.

Úpravou vztahu 2.4 pro výpočet hodnoty indukčnosti získáváme hodnotu indukčnosti cívky pro zpětnovazební obvod:

$$L = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C} \quad (2.10)$$

Dosazením hodnot do vztahu 2.10 získáme hodnotu indukčnosti  $L_1$  ze schématu 2.1:

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot 350000 \text{ Hz})^2 \cdot 170 \cdot 10^{-12} \text{ F}} = 1216 \cdot 10^{-6} \text{ H} \approx 1,2 \text{ mH} \quad (2.11)$$

Dosažením nové hodnoty indukčnosti do vztahu 2.4 získáme rezonanční kmitočet  $f_0$  laditelného oscilátoru:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1200 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot 170 \cdot 10^{-12} \text{ F}}} \approx 352,37 \text{ kHz} \quad (2.12)$$

Z vypočítaných hodnot indukčnosti cívky a kapacity kondenzátoru využitím vztahu 2.7 vypočítáme citlivost thereminu:

$$-79575 \cdot \frac{1}{\sqrt{1200 \cdot 10^{-6}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(170 \cdot 10^{-6})^3}} = -1,036 \quad (2.13)$$

### 2.1.2 Referenční oscilátor

Tento funkční blok 2.2 je téměř identický s laditelným oscilátorem obvodu výšky tónu, jehož schéma je zakresleno na obrázku 2.1. Zapojení je navíc doplněno o sériovou kombinaci rezistoru  $R_4 = 470 \text{ } \Omega$  a potenciometru  $R_6 = 330 \text{ } \Omega$ , která slouží k jemnému doladění pracovního bodu tranzistoru. Tento jev využívá vlastnosti tranzistoru, kdy při změně nastavení pracovního bodu dochází také ke změně generované frekvence určenou LC prvky zpětné vazby. Při nastavení jezdce potenciometru do prostřední polohy odpovídá nastavení pracovního bodu referenčního oscilátoru nastavení pracovního bodu oscilátoru laditelného. Pro správnou funkci thereminu je žádoucí, aby v době, kdy není ruka v akčním rádiu antény, nebyl generován žádný tón. Za tímto účelem je do zpětnovazebního obvodu zařazen kapacitní trimr  $C_{16}$ . Ten svým rozsahem  $1.8 - 22 \text{ pF}$  kompenzuje klidovou kapacitu antény, která může být ovlivněna okolním prostředím, např. rozmístěním předmětů ležících v akčním rádiu antény.

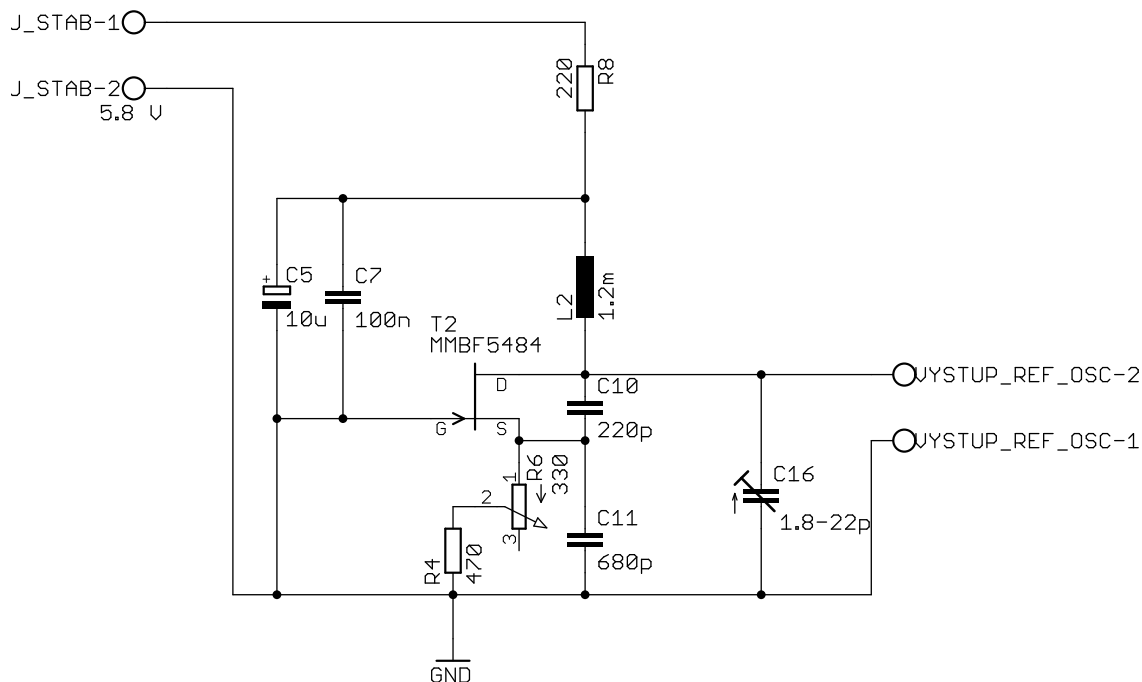
#### Výpočet mezí pracovního kmitočtu referenčního oscilátoru

Aplikací vztahu 2.4 pro hodnoty součástek zpětnovazebního obvodu získáme dvě mezní hodnoty rezonančního obvodu, na které může být oscilátor doladěn kapacitním trimrem tak, aby při absenci ruky neprodukoval žádný tón, tzn. aby frekvence laditelného i referenčního oscilátoru byly stejné. Při tomto výpočtu je vynechána klidová kapacita antény  $4 \text{ pF}$ . Kapacitní trimr zde slouží ke kompenzaci klidové kapacity antény.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1200 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot (166 \cdot 10^{-12} + 1,8 \cdot 10^{-12}) \text{ F}}} \approx 354,44 \text{ kHz} \quad (2.14)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1200 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot (166 \cdot 10^{-12} + 22 \cdot 10^{-12}) \text{ F}}} \approx 334,88 \text{ kHz} \quad (2.15)$$

Porovnáním výsledku vztahu 2.14 a 2.15 s výsledkem výpočtu 2.12 víme, že změnou hodnoty kapacitního trimru otáčením budeme schopni naladit referenční oscilátor na stejnou frekvenci, jakou má laditelný oscilátor.



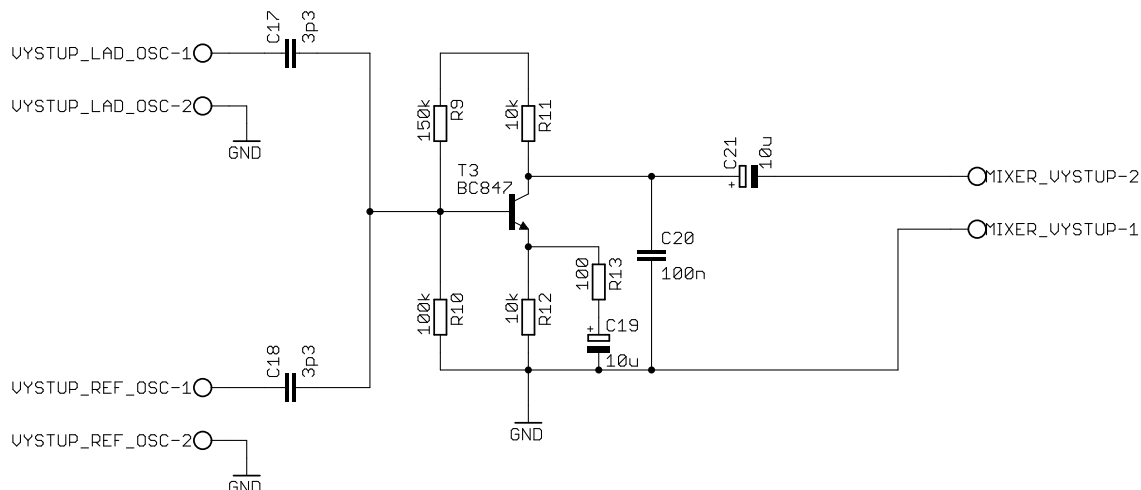
Obr. 2.2: Schéma referenčního Colpittsova oscilátoru

## 2.2 Směšovač

Směšovač je typ obvodu, který je schopen provést rozdíl a součet vstupního signálu vlivem nelinearity svého přechodu. V praxi se směšovač realizuje pomocí diody nebo pomocí tranzistoru. V rámci tohoto návrhu byl vybrán směšovač, který využívá ve svém zapojení tranzistor. Tento tranzistor je použit v zapojení se společným emitorem. Pracovní bod tohoto tranzistoru je určen napěťovým děličem v bázi tranzistoru rezistory  $R_9$  a  $R_{10}$ , dále rezistorem  $R_{11}$  v kolektoru a rezistorem v emitoru  $R_{12}$ . Sériová kombinace rezistoru  $R_{13}$  a  $C_{19}$  slouží pro nastavení hodnoty zesílení střídavých signálů. Kondenzátor na výstupu  $C_{20}$  slouží k filtraci vyšších harmonických složek nízkofrekvenčního již smíšeného signálu. Tento kondenzátor se podílí na charakteru výsledného tónu. Kondenzátor  $C_{21}$  slouží k filtraci velmi nízkých kmitočtů ( $<10$  Hz) [12].

## 2.3 Funkční blok ovládání hlasitosti tónu

Funkční blok ovládání hlasitosti tónu se skládá z oscilátoru, paralelního rezonančního obvodu, převodníku frekvence na napětí a útlumového článku řízeného napětím. Návrh tohoto obvodu je inspirovaný zapojením [11].



Obr. 2.3: Schéma směšovače

### 2.3.1 Referenční oscilátor

Základem tohoto funkčního bloku je referenční oscilátor generující frekvenci, která je rovna rezonančnímu kmitočtu prvků zpětné vazby. Jako u předešlých dvou oscilátorů se jedná o Colpittsov oscilátor, v tomto případě je realizován bipolárním tranzistorem BC847 v zapojení se společnou bází.

#### Nastavení pracovního bodu NPN tranzistoru v zapojení se společnou bází

Výpočet odporového děliče  $R_{18}$ ,  $R_{19}$  ze schématu 2.4 pro nastavení proudu báze:

$$U_{\text{stab}} = 5,8 \text{ V} \quad (2.16)$$

Poměr rezistorů je vhodné zvolit tak, aby byl zajištěn dostatečný proud do báze a také s ohledem na spotřebu celého zařízení. Volbou poměru rezistorů  $R_{18} > R_{19}$  zajistíme větší rozkmit napětí na výstupu obvodu.

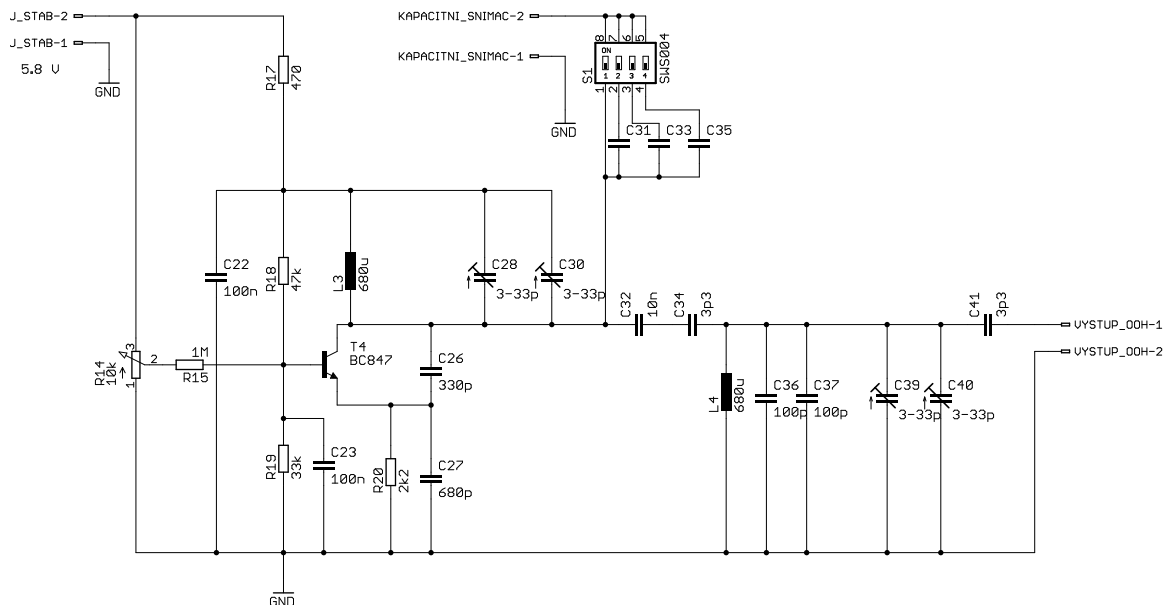
$$U_B = U_{\text{stab}} \frac{R_{19}}{R_{18} + R_{19}} = 5,8 \text{ V} \frac{47000 \Omega}{33000 \Omega + 47000 \Omega} \doteq 3,4 \text{ V} \quad (2.17)$$

Zvolíme proud tekoucí emitorem  $I_E = 0,8 \text{ mA}$  za předpokladu  $I_E \approx I_C$ . Z hodnoty napětí  $U_E$  a hodnoty proudu  $I_E$  vypočteme hodnotu odporu  $R_E$  ( $R_{20}$  ve schématu 2.4) :

$$R_E = \frac{U_E}{I_E} = \frac{U_{\text{vst}} - U_B - U_{BE}}{I_E} = \frac{5,8 \text{ V} - 3,4 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{0,6 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 2125 \Omega \approx 2k2 \text{ k}\Omega \quad (2.18)$$

Kombinace rezistoru  $R_{14}$  a potenciometru  $R_{15}$  slouží k jemnému doladění pracovního bodu, stejný princip byl použit u referenčního oscilátoru OVT.





Obr. 2.4: Schéma referenčního oscilátoru obvodu ovládání hlasitosti

### Zpětnovazební obvod referenčního oscilátoru ovládání hlasitosti

Zpětná vazba určující rezonanční frekvenci je v tomto obvodu určena cívkou  $L_3$  a kondenzátory  $C_{26}$ ,  $C_{27}$  a kapacitními trimry  $C_{28}$  a  $C_{30}$ . Volba hodnot součástek tohoto zpětnovazebního obvodu není příliš kritická, je však důležité nezvolit stejnou frekvenci či  $2k$  násobek frekvence oscilátorů OVT, kde  $k \in (0, 1, 2, \dots)$ . Hodnoty součástek můžeme zvolit např.:  $L_3=680 \mu\text{H}$ ,  $C_{26}=330 \text{ pF}$  a  $C_{27}=680 \text{ pF}$ . Dosazením do vztahu pro rezonanční kmitočet Colpittsova oscilátoru určíme rezonanční kmitočet takto zvolených hodnot součástek zpětné vazby.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{680 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \frac{330 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot 680 \cdot 10^{-12} \text{ F}}{330 \cdot 10^{-12} \text{ F} + 680 \cdot 10^{-12} \text{ F}}}} \approx 409,47 \text{ kHz} \quad (2.19)$$

Pro širší možnosti doladění je zpětnovazební obvod doplněn paralelní kombinací kapacitních trimrů pro zvětšení přeladitelnosti a tedy i širší možnosti nastavení odezvy OOH. Ve výchozím stavu uvažujme, že hodnota kapacitních trimrů je nastavena do poloviny rozsahu, generovaná frekvence je pak rovna:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{680 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \frac{363 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot 680 \cdot 10^{-12} \text{ F}}{363 \cdot 10^{-12} \text{ F} + 680 \cdot 10^{-12} \text{ F}}}} \approx 396,74 \text{ kHz} \quad (2.20)$$

### 2.3.2 Paralelní rezonanční obvod

Paralelní rezonanční obvod vychází z chování základních obvodových prvků R, L, C v obvodu s proměnným signálem. Paralelní rezonanční obvod je definován svým

rezonančním kmitočtem, admitancí a jakostí. Rezonance nastává za podmínky, kdy se kapacitance rovná induktanci, tedy  $X_C = X_L$ , rezonanční kmitočet je pak určen Thomsonovým vztahem [3]. Paralelní rezonanční obvod dosahuje při rezonanci maximální hodnoty impedance a obvodem pak prochází nejmenší proud. [20] V rámci tohoto návrhu zastává paralelní rezonanční obvod funkci pásmové propusti. Ve stavu, kdy je ruka mimo akční radius antény, prochází obvodem ovládání výšky tónu téměř maximální proud a paralelní rezonanční obvod tak pracuje v blízkém okolí své rezonance. Paralelní rezonanční obvod je tvořen cívkou  $L_4$ , kondenzátory  $C_{36}, C_{37}$  a kapacitními trimry  $C_{39}, C_{40}$ .

Hodnotu cívky  $L_4$  je vhodné zvolit identickou jako v předchozí části obvodu  $L_4 = L_3 = 680 \text{ } \mu\text{H}$ . Při návrhu paralelního rezonančního obvodu je vhodné ponechat velkou rezervu pro pozdější možnost přeladování. Určíme rezonanční kmitočet, který bude odpovídat generovanému kmitočtu referenčního generátoru při nastaveném polovičním rozsahu kapacitních trimrů  $C_{28}$  a  $C_{30}$ , přibližně tedy 403 kHz. Úpravou vztahu pro rezonanční kmitočet paralelního rezonančního obvodu určíme hodnotu celkové kapacity:

$$C = \frac{1}{(2\pi \cdot 403000 \text{ Hz})^2 \cdot 680 \cdot 10^{-6} \text{ H}} = 237 \cdot 10^{-12} \text{ H} \approx 230 \text{ pF}. \quad (2.21)$$

Tato kapacita může být tvořena paralelní kombinací kondenzátorů, tedy např.  $C_{36} = 100 \text{ pF}$ ,  $C_{37} = 100 \text{ pF}$  a kapacitním trimrem  $C_{39}$ , jenž je nastaven na maximum svého rozsahu, který odpovídá hodnotě 33 pF. Kapacitní trimr  $C_{40}$  slouží jako případná rezerva při potřebách doladění stejně jako kapacitní trimr  $C_{30}$  obvodu referenčního oscilátoru. Kondenzátory  $C_{34}$  a  $C_{41}$  plní funkci stejnosměrného oddělení paralelního rezonančního obvodu od referenčního oscilátoru a od převodníku frekvence na napětí.

V okamžiku, kdy se ruka začíná přibližovat akčnímu radiusu antény, se začíná měnit frekvence oscilátoru a impedance paralelního rezonančního obvodu se začíná snižovat. Signál z generátoru je pak paralelním rezonančním obvodem zkratován a nepokračuje do následujícího obvodu ovládání hlasitosti tónu - převodníku frekvence na napětí. Hodnoty obvodových prvků tohoto rezonančního obvodu jsou pečlivě zvoleny, aby nastavením kapacitních trimrů bylo možné ovládat hlasitost tónu v obou směrech, tedy v takovém smyslu, aby s rukou přibližující se k anténě frekvence rostla nebo klesala.

V případě, ve kterém je vyžadováno chování, kdy s přibližující se rukou hlasitost roste, nastavením kapacitních trimrů  $C_{28}$  a  $C_{30}$  referenčního oscilátoru funkčního bloku OOH je nutné nastavit vyšší tak, aby při téměř bezprostředním dotyku bylo dosaženo maximální hlasitosti. Klidová frekvence referenčního oscilátoru bude vyšší

než rezonanční kmitočet, při bezprostředním dotyku pak bude paralelní rezonanční obvod ve své rezonanci.

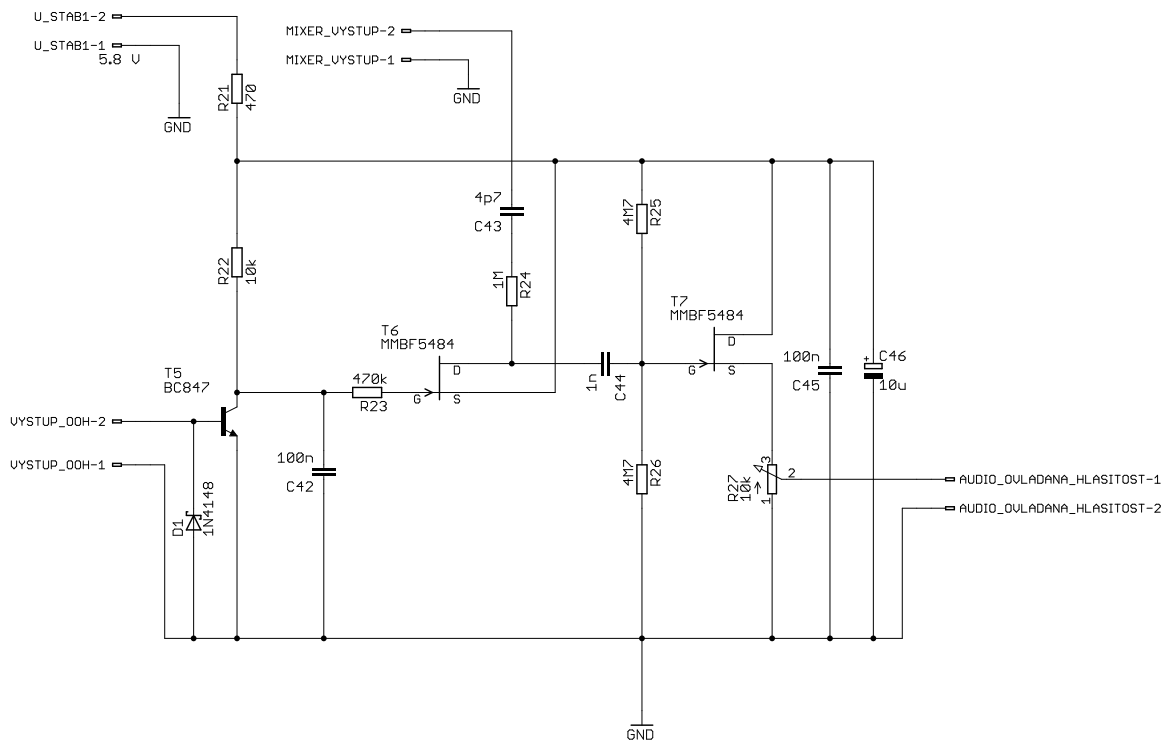
V opačném případě, kdy je požadováno, aby s přibližující se rukou hlasitost klesala, je vhodné upravit nastavení kapacitních trimrů paralelního rezonančního obvodu nebo referenčního oscilátoru, aby se frekvence v okamžiku, kdy je ruka mimo akční rádius antény, rovnala rezonanční frekvenci paralelního rezonančního obvodu. V tomto okamžiku dosahuje theremin maximální hlasitosti. S přibližující se rukou dochází ke snižování generované frekvence a obvod se dostává mimo svůj rezonanční kmitočet. Jemným nastavením kapacitních trimrů můžeme doladit rychlost změny hlasitosti, která se může pohybovat od maximální hlasitosti k nejnižší v rozmezí od 2 do 15 cm. Tato strmost přechodu je definována selektivností paralelního rezonančního kmitočtu, zejména jakostí obvodových prvků.

### 2.3.3 Převodník frekvence na napětí a útlumový článek řízený napětím

Tento obvod 2.5 je tvořen bipolárním tranzistorem  $T_5$ , diodou  $D_1$ , rezistorem  $R_{22}$  a kondenzátorem  $C_{42}$ . Rezistor  $R_{22}$  nastavuje pracovní bod tranzistoru a dioda  $D_1$  jednocestně usměrňuje signál, který prochází paralelním rezonančním obvodem. Na kolektoru tranzistoru  $T_3$  jsou kladné půlvlny generovaného signálu z oscilátoru obvodu ovládání hlasitosti tónu. Kondenzátor  $C_{42}$  filtruje průběh těchto kladných pulzů do podoby mírně zvlněného stejnosměrného napětí. V případě, kdy je paralelní rezonanční obvod v rezonanci, bázi tranzistoru prochází maximální proud, který mění hodnotu napětí kolektoru tohoto tranzistoru. Napětí na kolektoru tranzistoru  $T_5$  je přivedeno na gate tranzistoru  $T_6$ . Tento tranzistor je v zapojení proměnného odporu. Na elektrodu drain je přiveden signál z výstupu mixéru obvodu ovládajícího výšku tónu. Se snižujícím se proudem bázi tranzistoru  $T_5$  dochází k postupnému uzavírání kanálu drain-source a ke snižování amplitudy smíšeného signálu, který je přiváděn na elektrodu gate tranzistoru  $T_7$ . Tento tranzistor je v zapojení proudového zesilovače, zvyšuje tím zatížitelnost celého obvodu.

## 2.4 Předzesilovač

K výkonovému zesílení výstupního signálu je nutné návrh thereminu doplnit o předzesilovač, jenž bude schopen dostatečně silně vybudit připojenou zátěž. V tomto případě nejčastěji sluchátka. Pro tuto konkrétní aplikaci je velmi vhodná skupina zesilovačů označovaných třídou AB. Tato třída využívá předností samostatné třídy A a B. Zesilovač třídy A pracuje v lineární oblasti své voltampérové charakteristiky ( $>0,6$  V), tato třída vyniká velmi nízkou hodnotou zkreslení, nevýhodou je však



Obr. 2.5: Schéma převodníku frekvence na napětí a útlumového článku řízeného napětím

velmi nízká účinnost. Teoretická účinnost je rovna 50 procentům, ale v praxi dosahuje obvykle pouhých 25-30 procent. V zapojení zesilovače ve třídě B vede tranzistor pouze jednu půlvlnu vstupního signálu a klidový proud je téměř nulový. Tento typ zapojení dosahuje vyšší účinnosti, obvykle okolo 60 procent. Nevýhodou tohoto zapojení je vyšší zkreslení, než které produkuje zesilovač třídy A. Toto zapojení využívá zesilovače třídy A, který navazuje na zesilovač třídy B v konfiguraci push/pull.

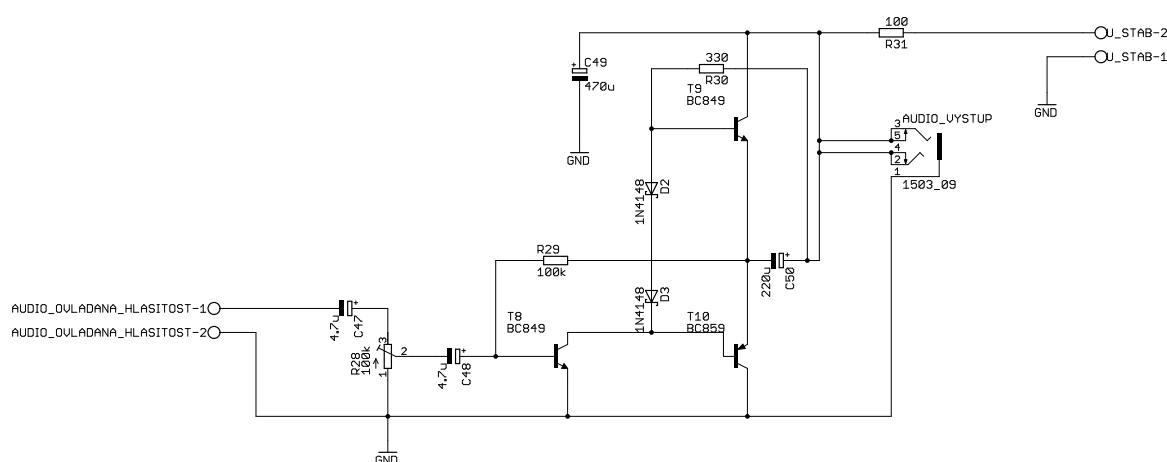
Kondenzátory  $C_{47}$  a  $C_{48}$  schématu 2.6 slouží k stejnosměrnému oddělení jednotlivých částí obvodů. Hodnota bývá volena obvykle z rozsahu 1 - 10  $\mu\text{F}$ , aby nedocházelo k ořezání nízkých frekvencí signálu. Tranzistor  $T_8$  pracuje jako napěťový zesilovač ve třídě A. Kombinace tranzistorů  $T_9$  a  $T_{10}$  tvoří komplementární dvojici v konfiguraci push/pull. Rezistor  $R_{29}$  slouží jako záporná zpětná vazba. Signálové diody 1N4148 slouží k nastavení rozdílu napětí mezi bázemi komplementární dvojice na rozdíl 1,2 V, který nastavuje pracovní bod obou tranzistorů těsně na počátek lineární části VA charakteristiky. V případě výkonových zesilovačů slouží dvojice diod k teplotní kompenzaci. Se zvyšující se teplotou tranzistorů komplementární dvojice dochází ke snížení napětí přechodu báze a emitoru. Bází tranzistoru protéká vyšší hodnota proudu [4]. Vyšší hodnota proudu bází vede ke zvýšení proudu přechodem

kolektoru a emitoru, zároveň se zvyšující se teplotou přechodů diod dochází ke snížení napětí přechodu. Diodami protéká proud, který sníží proud bázemi tranzistorů komplementární dvojice.

Kondenzátor  $C_{50}$  slouží jako záporná zpětná vazba pro střídavé signály. Tato vazba zvětšuje šířku přenášeného pásma a zároveň snižuje zkreslení při přechodu signálu přes hodnotu 0 V mezi tranzistory komplementární dvojice.

Sériová kombinace kondenzátoru  $C_{49}$  a rezistoru  $R_{31}$  slouží k plynulému startu předzesilovače, bez této sériové kombinace by došlo při zapnutí zařízení s připojenými sluchátkami k lupnutí.

Odběr tohoto předzesilovače je v klidovém stavu přibližně 40 mA, v zátěži pak 50 mA.



Obr. 2.6: Schéma předzesilovače ve třídě AB

## 2.5 Stabilizace vstupního napájení

Každé elektronické zařízení vyžaduje ke své plnohodnotné a spolehlivé funkci stabilní zdroj napájecího napětí. V rámci tohoto návrhu je počítáno jak s ryze bateriovým provozem, tak také s napájením formou síťového adaptéru.

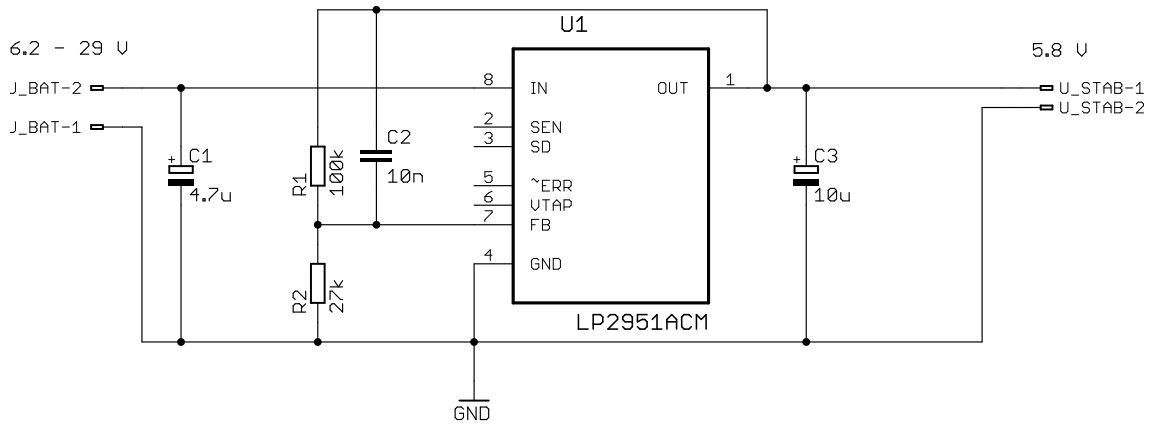
O stabilizaci vstupního napájení se stará obvod firmy Texas Instruments LP2951. Jedná se o stabilizátor s nízkým úbytkem napětí (LDO), který činí při minimálním odběru pouze 40 mV, při maximálním výstupním proudu 100 mA činí úbytek napětí na stabilizátoru 380 mV. Maximální odběr celého thereminu je 62 mA v plné zátěži, přičemž až 90 % odběru tvoří předzesilovač. V případě, že není sluchátkový výstup zatížen se klidový odběr celého thereminu pohybuje těsně nad hranicí 50 mA. Tento stabilizátor je schopen stabilizovat vstupní napětí v rozsahu 2.3 - 30 V.

### 2.5.1 Návrh zapojení stabilizátoru

Návrh zapojení byl proveden pro hodnotu výstupního napětí  $U_{stab} = 5,8 \text{ V}$ , která odpovídá rozdílu plně nabitého 6V olověného akumulátoru a maximálnímu úbytku napětí na stabilizátoru při průchodu maximální dovolené hodnoty proudu. Tato hodnota napětí byla stanovena záměrně pro zvýšení použitelnosti různých typů baterií.

Výstupní napětí stabilizátoru vypočteme pomocí vztahu:

$$U_{stab} = U_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (2.22)$$



Obr. 2.7: Schéma zapojení stabilizátoru LP2951

Vzhledem k minimální zátěži stabilizátoru, která je výrobcem stanovena na hodnotu  $1 \mu\text{A}$  je maximální hodnota rezistoru napěťového děliče zpětné vazby omezena na  $1,2 \text{ M}\Omega$ . Hodnotu  $R_1$  zvolíme např.  $100 \text{ k}\Omega$ , hodnotu druhého rezistoru napěťového děliče určíme úpravou vztahu 2.22:

$$R_2 = \frac{R_1}{\frac{U_{stab}}{U_{ref}} - 1} \quad (2.23)$$

Dosazením hodnot vypočítáme hodnotu rezistoru  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{100 \text{ k}\Omega}{\frac{5,8 \text{ V}}{1,23 \text{ V}} - 1} = 26914\Omega \approx 27\text{k}\Omega \quad (2.24)$$

S přihlédnutím k možnosti napájení celého zařízení síťovým adaptérem je vhodné se zaměřit na filtraci rušení síťovým kmitočtem, které by do stabilizátoru pronikalo a mohlo být následně zesíleno. Hodnotu zpětnovazebního filtračního kondenzátoru určíme ze vztahu:

$$C_{zk} = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot 200 \text{ Hz}} \quad (2.25)$$

Dosažením hodnoty  $R_1$  do vztahu 2.25 vypočteme hodnotu zpětnovazebního kondenzátoru  $C_2$ :

$$C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \text{ k}\Omega \cdot 200 \text{ Hz}} = 7,96 \text{ nF} \quad (2.26)$$

Při výběru vhodné kapacity tohoto zpětnovazebního kondenzátoru musíme brát v úvahu i výrobní tolerance kondenzátoru a teplotní charakteristiku materiálu X7R. V tomto konkrétním případě tedy můžeme jako blokovací kondenzátor využít obvyklejší hodnotu 10 nF.

Dle doporučení výrobce [8] je vhodné doplnit zapojení o vstupní kapacitu alespoň 1  $\mu\text{F}$  v případě, že vstupní napětí poskytuje baterie. V rámci tohoto návrhu byla použita vstupní kapacita 4,7  $\mu\text{F}$ .

Hodnota výstupního kondenzátoru byla převzata z doporučeného zapojení výrobce.

Obvod LP2951 je jediným integrovaným obvodem použitým v rámci návrhu tohoto zařízení.

## 2.6 Simulace chování obvodu v programu LTspice IV

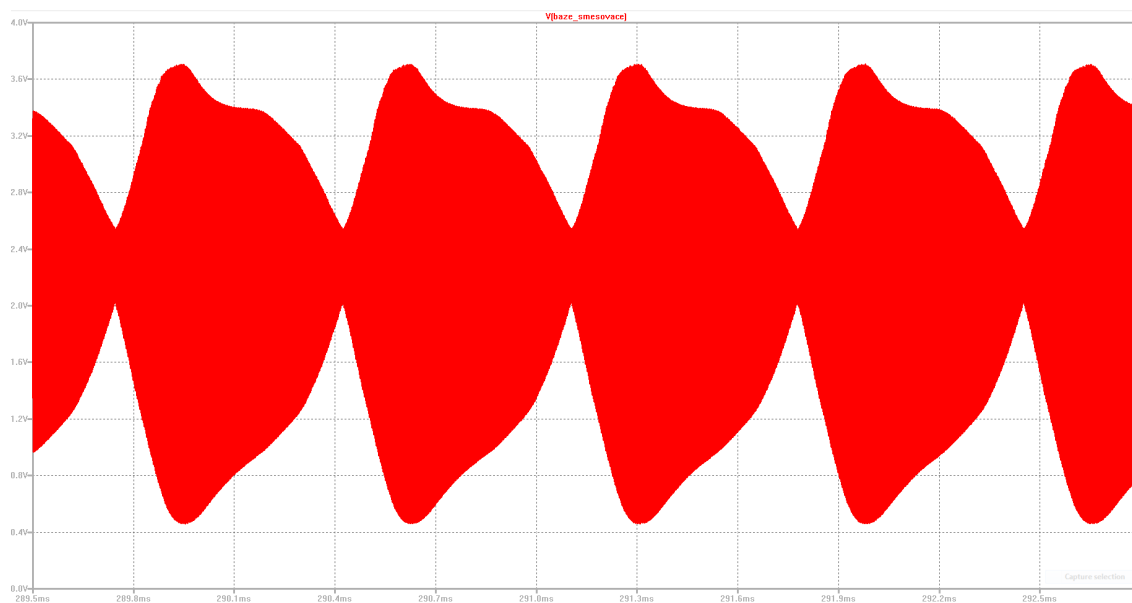
Před samotnou výrobou prototypu thereminu byla provedena simulace obvodu ve volně dostupné verzi programu LTspice IV firmy Linear Technology. Na základě těchto poznatků a minoritních úprav hodnot součástek byla zhotovena deska plošného spoje (DPS). Simulace byly provedeny pro obvod ovládání výšky tónu.

Na obrázku 2.8 jsou patrné výstupy podobné sinusovému signálu. Výstup referenčního (modrý průběh) a výstup laditelného (červeně) oscilátoru jsou propojeny v bázi směšovacího tranzistoru. Při nejnižší výchylce dochází k oříznutí, a tedy i mírnému zkreslení signálu. Na funkčnost zařízení však toto oříznutí nemá žádný vliv.

Obrázek 2.11 zachycuje průběh napětí výstupu kolektoru po filtraci kondenzátorem kapacity 100 nF. Rozdíl celkových kapacit laděných obvodů je v simulaci určen na 2 pF, tento rozdíl vytváří na výstupu signál s frekvencí přibližně 1500 Hz.

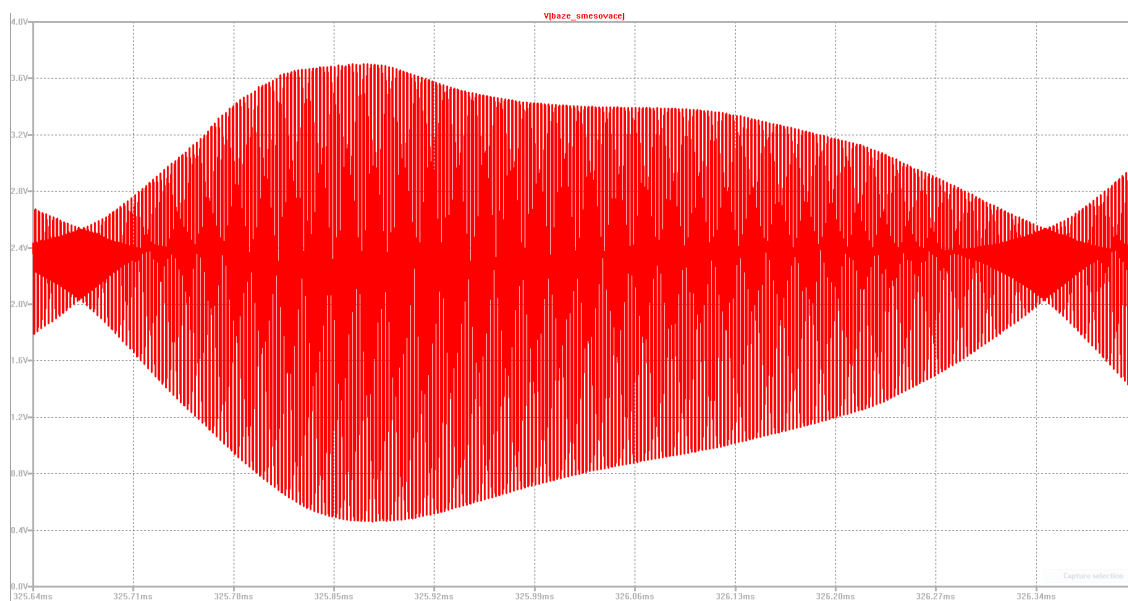


Obr. 2.8: Výstup kolektoru referenčního a laditelného oscilátoru.

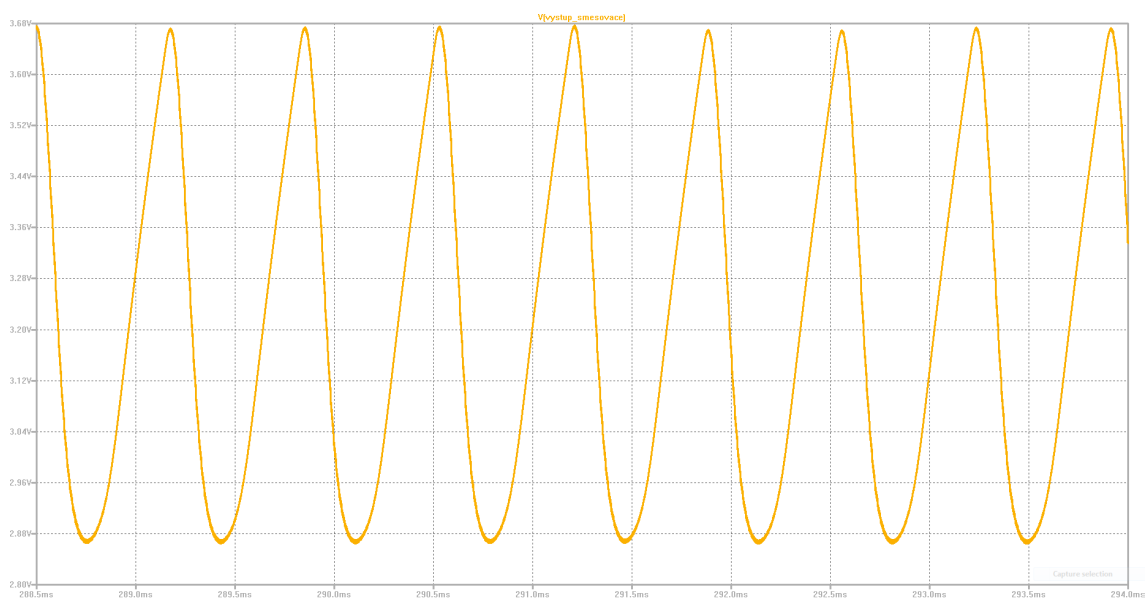


Obr. 2.9: Spojený průběh napětí báze tranzistoru





Obr. 2.10: Detail obálky napětí báze tranzistoru s VF složkou a zřetelnými záněji



Obr. 2.11: Průběh výstupního napětí směšovače

### 3 KONSTRUKCE DPS

Celý návrh tohoto zařízení byl při konstrukci desek plošných spojů rozdělen na čtyři samostatné desky dle funkčních bloků tohoto návrhu, viz přílohy. Výhodou rozdělení do čtyř segmentů je možnost otestování a odladění každého funkčního bloku nezávisle na bloku předchozím a následujícím. Mimo jiné i prevence vazby magnetických polí cívek přes vodivé spoje DPS, ale také zvýšenou vzdáleností jednotlivých funkčních bloků. Poslední z těchto výhod je také snadná oprava poškozeného funkčního bloku pouhou výměnou za funkční kus osazené DPS, tímto odpadá nutnost složité demontáže, analýzy a výměny vadných součástek.

Desky plošných spojů byly zhotoveny v laboratoři prototypového vývoje na Ústavu Telekomunikací VUT FEKT. Tloušťka mědi vodivých spojů odpovídá běžné hodnotě 35  $\mu\text{m}$ . V rámci prototypového vývoje bylo nutno přistoupit k odstranění rozsáhlých zemních ploch mědi, která se v blízkém okolí oscilátorů chovala jako parazitní kapacita vůči zemi a snižovala plnohodnotnou funkčnost tohoto zařízení. Zemní rozvod byl proveden tlustým spojením, mezi deskami došlo ke spojení zemí obvodů v jednom bodě ve smyslu hvězdicovité topologie [21].

V návaznosti na připomínky komise semestrální práce byl dosavadní návrh desky plošných spojů upraven pro povrchovou montáž součástek. Výhodou povrchové montáže v tomto konkrétním případě je fakt, že LC prvky podílející se na určení rezonančního kmitočtu jsou umístěny velmi blízko sobě, dochází tím k omezení parazitních vlastností vodivých spojů. Mezi součástkami jsou menší rozdíly teplot, které vedou k lepší teplotní stabilitě celého oscilačního bloku.

V tomto případě však nedochází ke zmenšení rozměrů celé desky, neboť každý blok obsahující ve svém zapojení cívku musí být vzdálen od ostatních cívek alespoň 5 cm. Navíc je vhodné jednu z dvojice cívek, otočit o 90 stupňů tak, aby docházelo k menší vazbě magnetických polí cívek. V případě, že by byly cívky umístěny blízko sebe, mohlo by dojít k vazbě magnetických polí cívek referenčního a laděného oscilátoru. Tato dvojice by měla tendenci udržovat společně jednu oscilační frekvenci a došlo by tím ke snížení funkčního rozsahu a odezvy kapacitní antény bloku ovládajícího výšku tónu. Experimentálním měřením byl také výstup referenčního a laděného oscilátoru doplněn na každé větvi o rezistor, který snižuje míru vazby jednotlivých oscilačních bloků. Veškeré cívky použité při konstrukci thereminu je vhodné dimenzovat tak, aby parametr  $SRF_{min}$  byl roven alespoň dvojnásobku pracovní frekvence oscilátoru. Pro teplotní stabilitu je důležité, aby všechny zpětnovazební kondenzátory byly tvořeny teplotně stabilním dielektrikem NPO/NP0.

Každý funkční blok byl doplněn o indikační LED diodu, která indikuje správně připojený zdroj napájení do Wago konektoru DPS. DPS byly po odpálení nežádoucí mědi laserem ošetřeny pájitelným servisním lakem SK10. Montáž součástek byla

provedena povrchově, výjimku tvořily pouze cívky a kapacitní trimry. Potenciometry nejsou umístěny na DPS, ale v panelu, s DPS jsou spojeny plochým kabelem. DPS jsou upevněny v dřevěné skřínce plastovými distančními sloupky v délce 20 mm.

### 3.1 Konstrukce thereminu

Vnější obal thereminu je tvořen dřevěnou dekorativní skřínkou s panty a proskleným horním víkem. Anténa ovládání výšky tónu je umístěna při čelním pohledu po pravé straně, zároveň je v pravé části krabíčky umístěn i obvod ovládající výšku tónu. Na levé straně pak anténa ovládání hlasitosti tónu a obvod ovládání hlasitosti tónu. Baterie a stabilizátor napájení je umístěn uprostřed celého zařízení. Sluchátkový předzesilovač je instalován uprostřed zařízení při zadní stěně dřevěné krabíčky, kde je také umístěn 3,5 mm jack konektor pro připojení zvukového výstupu. V zadním panelu je umístěn konektor pro připojení externího zdroje napájení v rozmezí od 6,3 do 29 V. V předním panelu po levé straně jsou umístěny prvky ovládání se spojitou regulací. Potenciometry jsou umístěny v návaznosti na umístění jednotlivých funkčních bloků v rámci skříňky. Potenciometr vlevo slouží k jemnému doladění citlivosti antény ovládající hlasitost tónu, prostřední potenciometr slouží k regulaci hlasitosti, potenciometr umístěný vpravo slouží k jemnému doladění výšky tónu. Přepínač externího a bateriového napájení je umístěn u pravého okraje předního panelu. Tento přepínač zajišťuje bezpečné přepínání mezi napájením tak, aby nedošlo k připojení externího zdroje s vyšším napětím na póly baterie.

### 3.2 Antény - kapacitní snímače

Důležitým parametrem návrhu vnější schránky thereminu je dostatečná izolační vzdálenost akčních rádiusů antén ovládajících příslušné funkční bloky.

Anténa ovládání výšky tónu je tvořena prutovou teleskopickou anténou délky 700 mm a průměru 6 mm, která je umístěna vertikálně do dřevěného distančního hranolu, jenž zajišťuje odsazení antény od dřevěné skříňky zařízení. Elektricky vodivé spojení antény je provedeno šroubem M3, který je zašroubován v anténě a zároveň veden dřevěným distančním hranolem. Hranol je vymezen kovovými podložkami, pomocí kterých je možné anténu libovolně natočit. Složením antény a otočením o 90 stupňů je možné dosáhnout maximální skladnosti (160 mm). Uvnitř skříňky je vyvedeno očko, které je Faston konektorem s OVT spojeno pomocí Wago svorky.

Anténa ovládání hlasitosti tónu je tvořena měděnou trubicí o průměru 10 mm, délky 500 mm, která je vytvarována ohýbáním do podoby smyčky. Levý bok skříňky

je doplněn dvěma trubicovými spojkami pro průměr 10 mm. Anténa OOH je zajištěna stahovacími chromovanými maticemi, jež upevňují anténu ve spojkách. Anténa je připojena pomocí Faston konektoru s OOH přes Wago svorku. Pro potřeby přenášení zařízení je skříňka doplněna o vyjímatelné desky, do kterých lze anténu zasunout a upevnit. Tento typ uložení je zřejmý na obrázku C.5.

### 3.3 Základní nastavení thereminu

Po upevnění jednotlivých funkčních bloků do dřevěné skříňky a připojení antén do bloků OVT a OOH stačí pouze minimální míra doladění. Na začátku nastavení je vhodné propojit OVT pouze se sluchátkovým zesilovačem. Teleskopickou prutovou anténu OVT vysuneme tak, že poslední díl necháme zasunutý pro případné doladění frekvence. Nastavíme kapacitní trimr  $C_{16}$  do pozice, ve které theremin při absenci ruky v akčním rádiu thereminu negeneruje žádný tón. V případě, že ladění trimrem je příliš citlivé, je možné k doladění také využít variabilní délku prutové antény. Zasunutím části antény kapacitu snižujeme, vysunutím naopak zvyšujeme. Jemnou odezvu thereminu je možné doladit potenciometrem  $R_6$ , který je umístěn na pravé straně předního panelu.

Po základním nastavení OVT přepojíme výstup směšovače do obvodu OOH a výstup OOH do vstupu sluchátkového předzesilovače. V případě, že požadujeme, aby se hlasitost s přibližující rukou snižovala, nastavíme paralelní kombinaci kapacitních trimrů  $C_{39}$  a  $C_{40}$  do poloviny svého rozsahu. Dále nastavujeme paralelní kombinaci kapacitních trimrů  $C_{28}$  a  $C_{30}$  tak, aby na výstupu paralelního rezonančního obvodu nastala rezonance, tedy maximální výchylka signálu. K nastavení obvodu OOH je vhodné využít osciloskop, který připojíme na výstup OOH. V tomto okamžiku je nutné mít na paměti, že sonda kapacitně obvod zatěžuje, pro přesné nastavení je tedy vhodné využít sondu s vysokým dělicím poměrem nebo odezvu obvodu nastavit pouze pomocí sluchu. K jemnému doladění odezvy antény slouží potenciometr  $R_{14}$ .

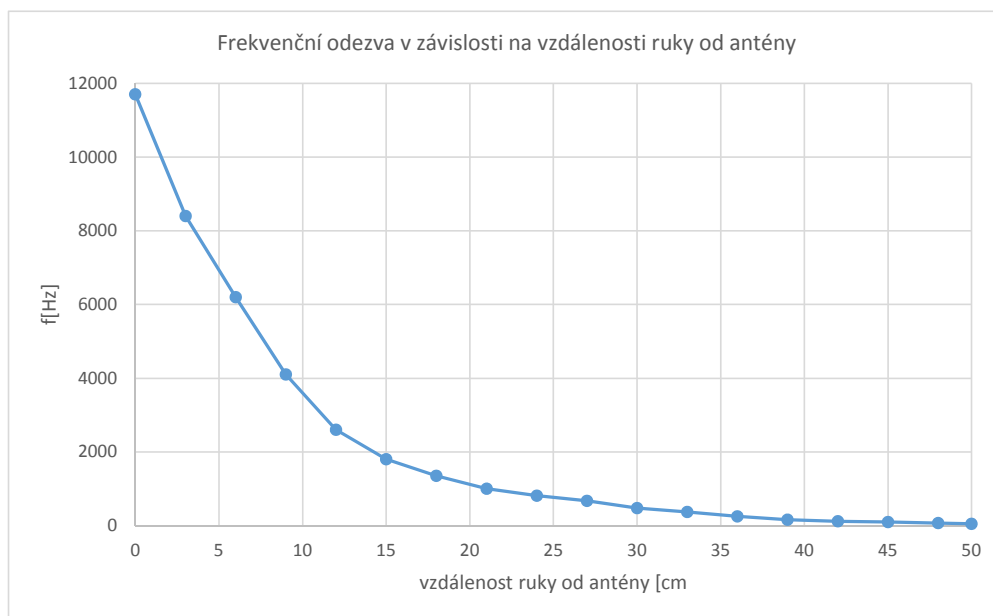
V případě, že má anténa OOH příliš citlivou odezvu, můžeme citlivost snížit pomocí DIP přepínače SWS004. V základním nastavení je zapnut pouze přepínač č.1, pokud chceme snížit citlivost, postupně můžeme přepínat paralelní kombinace kondenzátorů  $C_{31}$ ,  $C_{33}$  a  $C_{35}$ . Tato kombinace kondenzátorů spolu s anténou tvoří sériovou kapacitu, která vede ke snížení odezvy celého obvodu.

Komfortní hladinu hlasitosti je možné upravit potenciometrem  $R_{27}$ . Při běžném provozu thereminu stačí kapacitní trimry nastavit pouze jednou. Doladění na aktuální podmínky hry stačí provést pomocí potenciometrů.

Pro provoz thereminu nejsou vhodné spínané zdroje, protože zavádí do zařízení rušení vysokofrekvenčním spínáním.

### 3.4 Výsledky měření

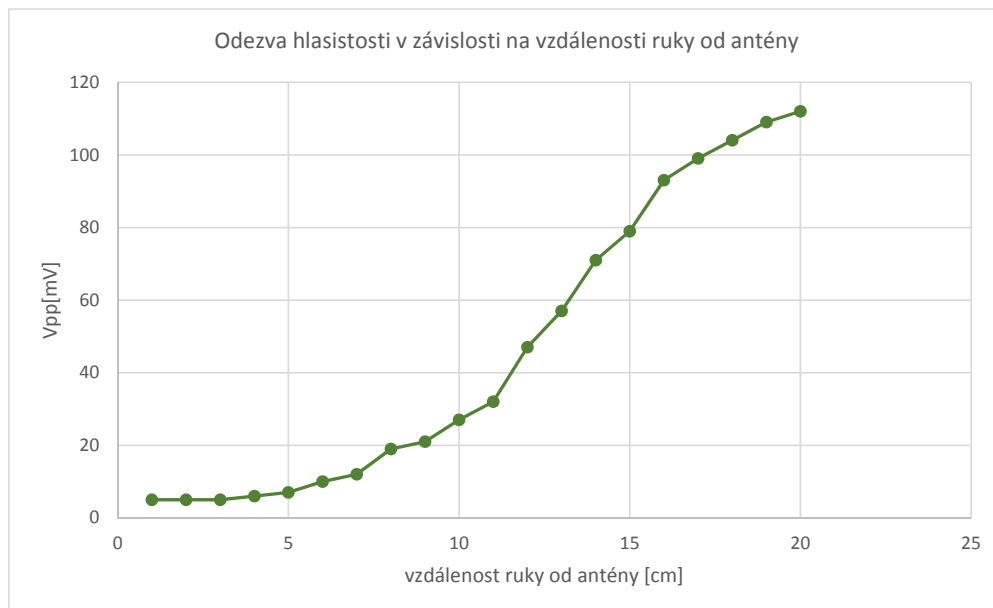
Po úspěšném sestavení celého zařízení byla změřena frekvenční a hlasitostní odezva thereminu v závislosti na vzdálenosti ruky od antény.



Obr. 3.1: Průběh frekvenční odezvy thereminu v závislosti na vzdálenosti ruky od antény

Nastavením potenciometru  $R_{24}$  a kapacitního trimru  $C_{16}$  je možné kromě nastavení výchozího pracovního bodu ovlivnit i vzdálenost, na kterou bude theremin reagovat. V rámci tohoto měření bylo nastavení reakční vzdálenosti provedeno pro co nejvyšší vzdálenost. Theremin začíná reagovat při vzdálenosti 50 cm od středu antény, efektivně na něj lze hrát přibližně do vzdálenosti 10 cm. S nižší vzdáleností neúměrně roste generovaná frekvence a theremin není pro přesnou hru v tomto rozsahu uspokojivě použitelný. Charakter rapidního růstu frekvence není konstrukční vadou. Tento jev vychází ze závislosti kapacity dvou předmětů ve svém blízkém okolí.

Při měření závislosti výstupního napětí na vzdálenosti ruky od antény byla reakční vzdálenost a citlivost nastavena s ohledem na subjektivně komfortní pocit kontroly. Příliš citlivé nastavení, tedy v případě, že by vzdálenost mezi maximální



Obr. 3.2: Průběh výstupního napětí OOH v závislosti na vzdálenosti ruky od antény

a minimální hlasitostí byla zúžena na oblast několika centimetrů, by při hře působila diskontinuálním dojmem. Naopak pokud by bylo nastavení provedeno s nižší citlivostí, bylo by jistě přínosem pro subjektivní pocit z plynulé změny hlasitosti tónu, avšak dlouhé pohyby rukou, ovládající hlasitost tónu, by pro osobu hrající na theremin byly příliš namáhavé.

## 4 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit funkční prototyp hudebního nástroje - thereminu. V teoretické části této práce jsem se zabýval rozбором možných technických řešení, tedy konkrétně výběru vhodného typu oscilátoru, který je naprosto stěžejním prvkem v principu funkce celého thereminu. Největší důraz byl kladen na oscilátory využívající LC laděného obvodu ve zpětné vazbě, které dle mého názoru mají největší potenciál pro uplatnění v thereminu.

Pro samotný návrh oscilátoru obvodu ovládání výšky tónu jsem zvolil Colpittsovo zapojení tříbodového oscilátoru. Pro návrh bylo využito zapojení tranzistoru řízeného polem s uzemněnou elektrodou gate a možností jemného doladění pracovního bodu. Po samotném návrhu byla provedena simulace obvodu v programu LTspice IV, která prokázala správnost zapojení.

Obvod ovládání hlasitosti tónu byl též navržen s využitím Colpittsova oscilátoru, avšak v zapojení s bipolárním tranzistorem v konfiguraci se společnou bází. Pro detekci vzdálenosti ruky od antény pak byl navržen obvod využívající vlastností paralelního rezonančního obvodu. Zařízení poskytuje možnost jemného doladění pomocí potenciometrů na předním panelu pro potřeby hudebníka tak, aby již nebylo nutné při hře dále nastavovat kapacitní trimry uvnitř zařízení. Reakční vzdálenost thereminu je okolo 40 – 50 cm, s přibližováním ruky k anténě se frekvence generovaného tónu zvyšuje, závislost frekvence na vzdálenosti ruky je analogická vztahu kapacity mezi deskami kondenzátoru v závislosti na jejich vzdálenosti a není tedy v celém rozsahu lineární. Užitečný rozsah zařízení je okolo 30 – 40 cm. V blízkém okolí antény, tedy okolo 10 cm a méně, se frekvence prudce mění. V této oblasti by tedy mohl tento theremin najít využití převážně v experimentální hudbě. Rozsah antény ovládání hlasitosti tónu je možné individuálně přizpůsobit v rozsahu 2 cm – 20 cm, nastavení je určeno pozicí na rezonanční křivce paralelního rezonančního obvodu.

Vzhledem k povaze a principu vzniku zvuku byla konstrukce zařízení obtížná v oblasti kapacitních vazeb jednotlivých prvků obvodu a také v naprosté nemožnosti zařízení testovat na nepájivém poli, které svým rozmístěním pinů zanáší příliš velké parazitní kapacitní vazby. Jednotlivé uzly spolu s vývody součástek tvoří antény, obvod se poté chová nepředpovědatelně a nemá svoji plnou funkcionalitu. Každá modifikace obvodu musela být odsimulována a následně bylo teprve přikročeno k výrobě další prototypové DPS. Hlavním aspektem při návrhu a konstrukci DPS thereminu je odstranění rozsáhlých zemních ploch, které mají u většiny obvodů pozitivní stínící účinky, avšak v tomto konkrétním případě způsobovaly nežádoucí a neočekávané chování obvodu. Nesmí být opomenuta ani dostatečná izolační vzdálenost dvou cívek, mezi kterými by mohla vzniknout vazba.

Elektronické obvody thereminu jsou umístěny v dřevěné dekorativní krabičce s

nápisem 1928 na skle horního víka, který symbolicky připomíná dobu vzniku prvního prototypu thereminu, kterou zkonstruoval L. Těrmen. Konstrukce antén je přizpůsobena tradičnímu pojetí thereminu, levá anténa je tvořena smyčkou, pravá anténa je prutového typu.

Vývoj tohoto zařízení stál přibližně 2500 Kč, celková cena součástí pro výrobu jednoho kusu je však podstatně nižší (přibližně 500 Kč/kus). Pokud by mělo dojít k výrobě tohoto kusu ve vyšším počtu, bylo by vhodné odladit obvod tak, aby bylo možné snížit počet kapacitních trimrů, jejichž cena má velmi vysoký podíl na výsledné ceně.

Toto zařízení by se se svojí nízkou cenou mohlo v budoucnu stát případnou alternativou ke komerčně vyráběným přístrojům, např. Distant Voices Theremin (2100 Kč) české firmy Widara [10]. Theremin ovšem svou jednoduchostí zapojení nedosahuje takových kvalit, aby mohl konkurovat profesionálním thereminům, např. modelu Etherwave Plus (12 590 Kč) firmy Moog Instruments [14], který využívá násobně větší počet obvodů zpracovávajících kapacitní změny antén thereminu.



# LITERATURA

- [1] BIOLEK, Dalibor *Elektronické obvody I: učebnice*. Vyd. 1. Brno: Univerzita obrany, 2006, 318 s. ISBN 80-7231-169-7.
- [2] BIOLEK, Dalibor., HÁJEK Karel., KRTIČKA Antonín *Analogové elektronické obvody: přednášky*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky 2007, 125 s. ISBN 978-80-214-3525-4.
- [3] BRANČÍK, Lubomír., DOSTÁL Tomáš. *Analogové elektronické obvody: přednášky*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2007, 125 s. ISBN 978-80-214-3525-4.
- [4] COATES, Eric.. *Class AB Power Amplifiers*. Learn about Electronics. [online]. 31.3.2016 [cit. 12.5.2016]. Dostupné z URL: <<http://www.learnabout-electronics.org/Amplifiers/amplifiers55.php>>.
- [5] ČOŽÍK, Ondřej. *Použití blokovacích kondenzátorů při návrhu DPS*. Slaboproudý obzor. [online]. 15.3.2013 [cit. 11.5.2016]. Dostupné z URL: <<http://www.slaboproudyobzor.cz/files/20130308.pdf>>.
- [6] ČTÚ. *Využití rádiového spektra*. Český telekomunikační úřad. [online]. 28.11.2015 [cit. 11.12.2015]. Dostupné z URL: <<http://spektrum.ctu.cz/>>.
- [7] Datasheet *MMBF5484*. Fairchild. [online]. 2.2009 [cit. 12.12.2015]. Dostupné z URL: <<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/MM/MMBF5484.pdf>>.
- [8] Datasheet *TI LP2951*. Texas Instruments. [online]. 5.2016 [cit. 12.12.2015]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp2951-n.pdf>>.
- [9] GALE, M. *Encyclopedia of world biography* [online]. 2005, [cit. 28.11.2015]. Dostupné z URL: <[http://www.encyclopedia.com/topic/Leon\\_Theremin.aspx](http://www.encyclopedia.com/topic/Leon_Theremin.aspx)>.
- [10] GW Acoustics. *Distant Voices Theremin*. Widara. [online]. [cit. 17.5.2016]. Dostupné z URL: <<http://www.widara.com/cs/distant-voices-theremin>>.
- [11] HARRISON ARTHUR *A Revised Version of the Southwest Technical Products Model 142*. Theremin.us. [online]. 27.2.2013, [cit. 28.11.2015]. Dostupné z URL: <<http://www.theremin.us/144/144.htm>>.

- [12] HARRISON ARTHUR *A New Version of the Model 144 Theremin*. Theremin.us. [online]. 5.11.2015, [cit. 2.5.2016]. Dostupné z URL: <<http://www.theremin.us/145/145.html>>.
- [13] MERCER, D. *Activity: The Colpitts Oscillator*. Analog Devices. [online]. 4.7.2015 [cit. 11.12.2015]. Dostupné z URL: <<https://wiki.analog.com/university/courses/electronics/comms-lab-colpitts-osc>>.
- [14] MOOG, Robert. *Etherwave*. Moog music. [online]. [cit. 17.5.2016]. Dostupné z URL: <<http://www.moogmusic.com/products/etherwave-theremins/etherwave-plus#info-tab>>.
- [15] NACHBAUR, Fred. *On theremin sensitivity*. DOGSTAR. [online]. 18.4.2002 [cit. 11.12.2015]. Dostupné z URL: <<http://www.dogstar.dantimax.dk/theremin/thersens.htm>>.
- [16] NOVOTNÝ, Vlastislav. *Nízkofrekvenční elektronika: přednášky*. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2002, 114 s. ISBN 80-214-2234-3.
- [17] SILICONIX. *JFET Biasing Techniques*. University of Colorado. [online]. 10.3.1997 [cit. 17.4.2016]. Dostupné z URL: <[http://www.colorado.edu/physics/phys3330/phys3330\\_sp16/Useful\\_Documents\\_files/AN102FETbiasing.pdf](http://www.colorado.edu/physics/phys3330/phys3330_sp16/Useful_Documents_files/AN102FETbiasing.pdf)>.
- [18] THEREMIN Léon *Method of and Apparatus for the Generation of Sounds*. U.S. Patent Number 1661058 Patented 1928. Dostupné z URL: <<http://www.pat2pdf.org/pat2pdf/foo.pl?number=1661058>>.
- [19] VACKÁŘ Jiří. *Stabilization of Resonant Circuits*. U.S. Patent Number 2706249. Patented 1955. Dostupné z URL: <<http://www.pat2pdf.org/pat2pdf/foo.pl?number=2706249>>.
- [20] VRBA, Kamil., KOTON, Jaroslav. *Filtrovací analogové obvody pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014, 146 s. ISBN 978-80-214-5067-7.
- [21] VRBA, Kamil. *Konstrukce elektronických zařízení*. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013, 251 s. ISBN 978-80-214-4719-6.

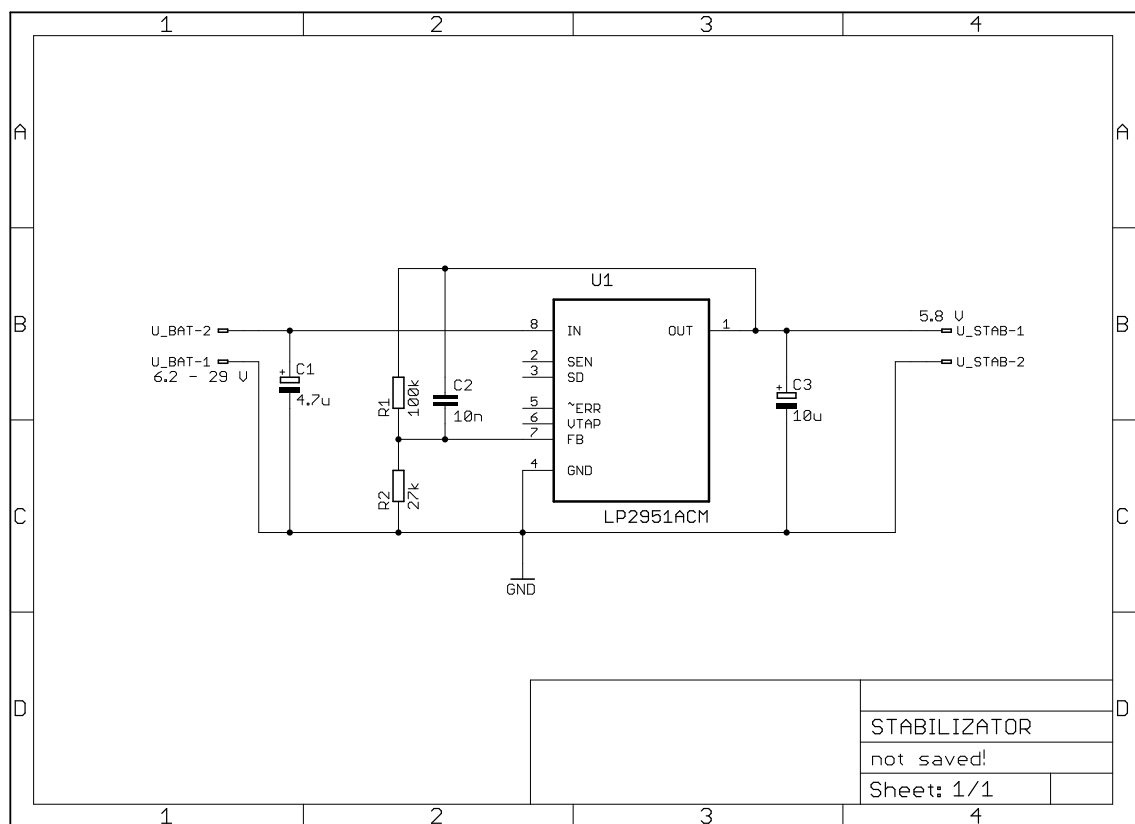
## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

|     |  |
|-----|--|
| DPS | deska plošných spojů                                   |
| LDO | Low Dropout - nízký úbytek                             |
| OVT | obvod výšky tónu                                       |
| OOH | obvod ovládající hlasitost                             |
| SB  | zapojení tranzistoru se společnou bází                 |
| SC  | zapojení tranzistoru se společným kolektorem           |
| SE  | zapojení tranzistoru se společným emitorem             |
| SRF | kmitočet vlastní rezonance součástky                   |
| VFO | variable-frequency oscillator – přeladitelný oscilátor |

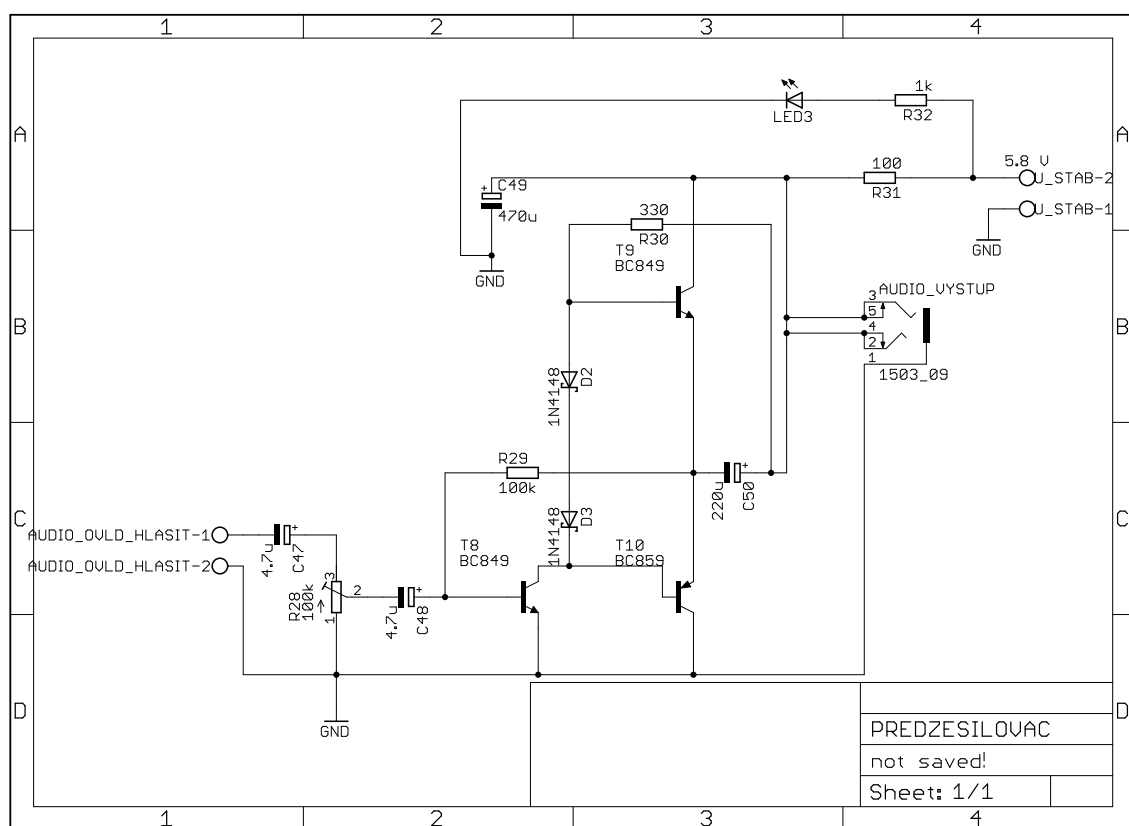
## SEZNAM PŘÍLOH

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| A Schémata zapojení funkčních bloků   | 53 |
| B Podklady pro výrobu DPS             | 57 |
| C Fotografie zkonstruovaného zařízení | 60 |
| D Obsah přiloženého CD                | 63 |

## A SCHÉMATA ZAPOJENÍ FUNKČNÍCH BLOKŮ



Obr. A.1: Schéma zapojení stabilizátoru vstupního napájení



Obr. A.2: Schéma zapojení předzesilovače

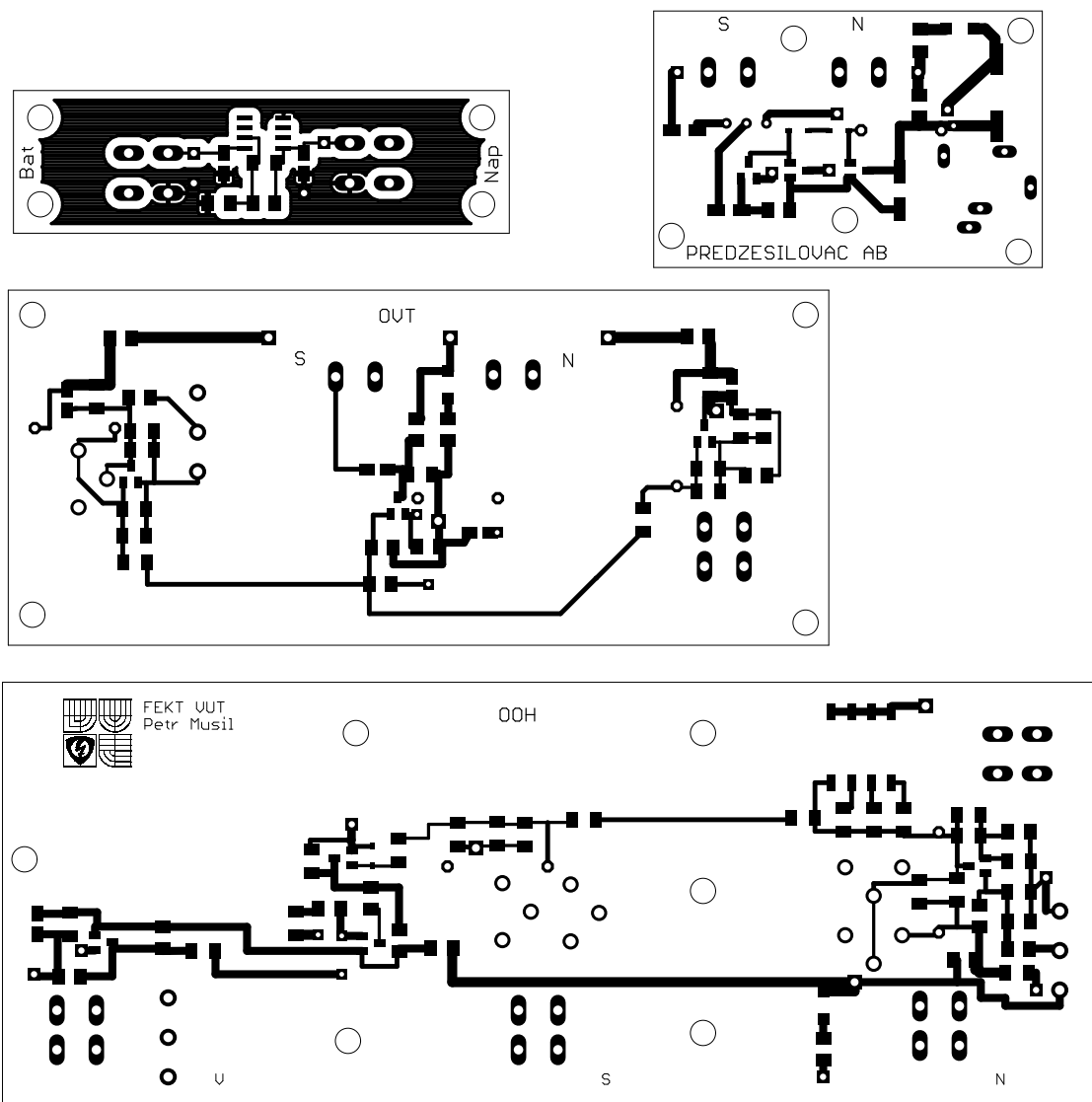


55

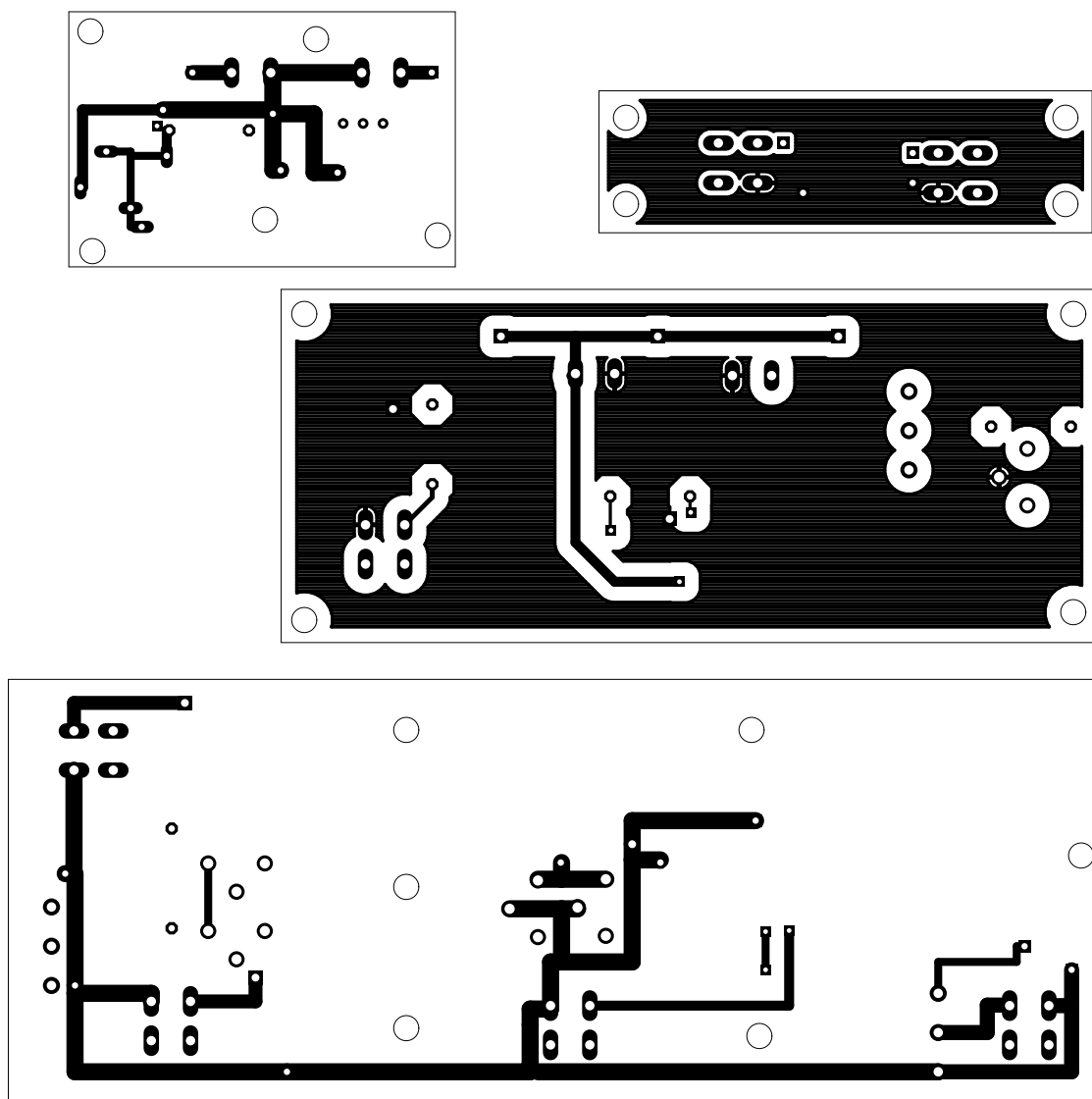




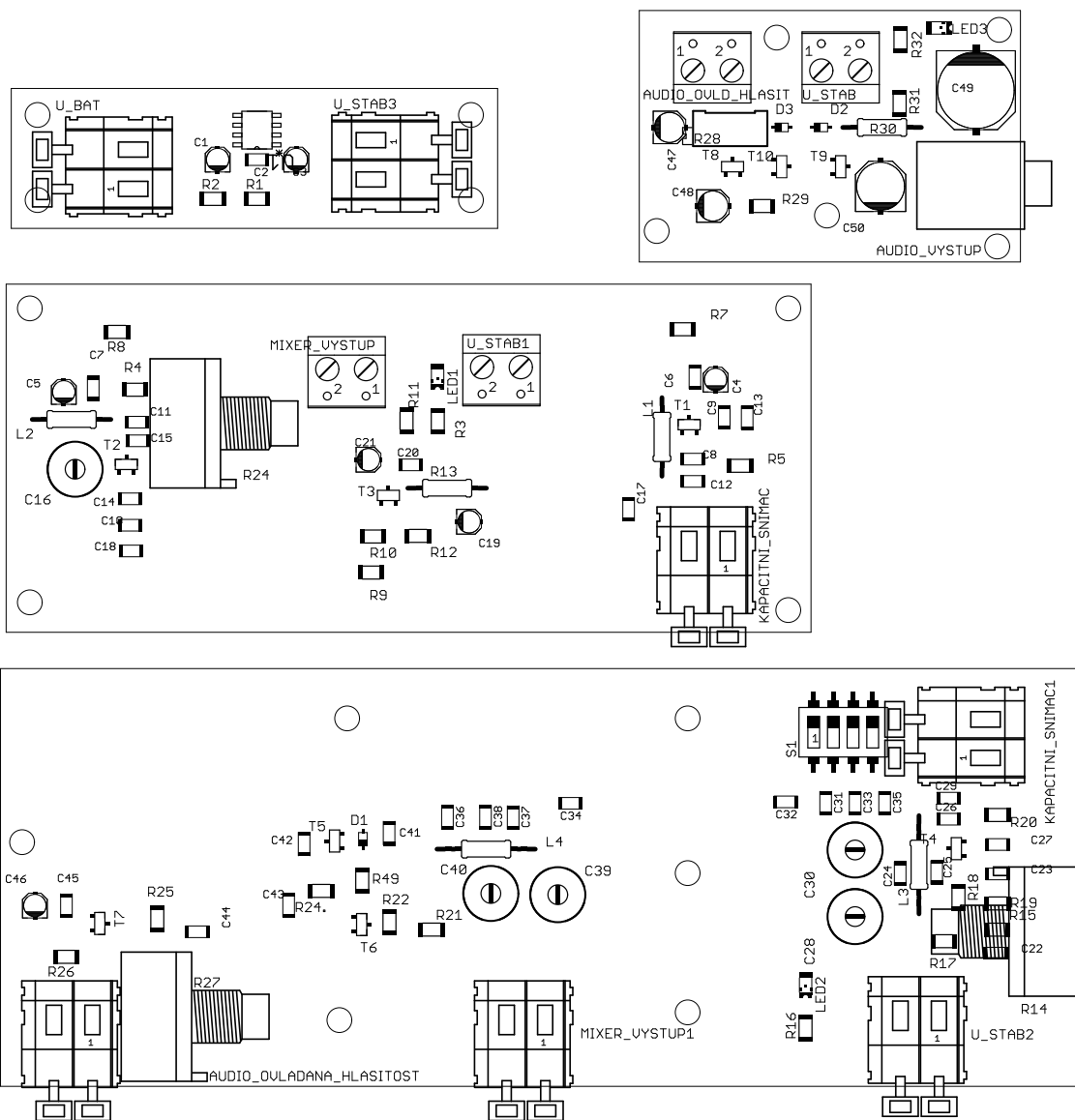
## B PODKLADY PRO VÝROBU DPS



Obr. B.1: DPS vrstva top



Obr. B.2: DPS vrstva bottom



Obr. B.3: Rozmístění součástek ve vrstvě top

## C FOTOGRAFIE ZKONSTRUOVANÉHO ZA- ŘÍZENÍ



Obr. C.1: Theremin v připraveném stavu ke hře



Obr. C.2: Pohled na čelní desku s ovládacími prvky

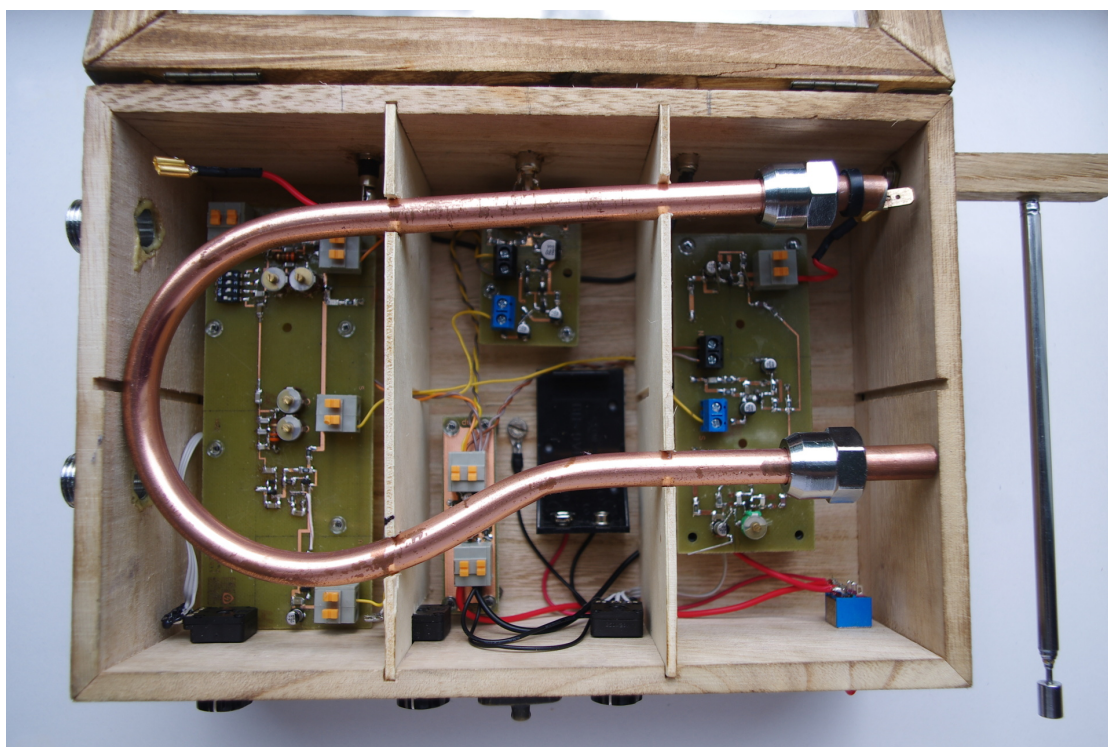


Obr. C.3: Pohled na zadní desku s konektory





Obr. C.4: Pohled na složený theremin



Obr. C.5: Vnitřní prostor thereminu s úchyty pro uložení antény

## D OBSAH PŘÍLOŽENÉHO CD

- / ..... kořenový adresář přiloženého CD
  - └─ DPS.....podklady pro výrobu DPS
    - └─ bot.eps
    - └─ ptop.eps
    - └─ top.eps
  - └─ fotografie.....fotografie zhotoveného zařízení
    - └─ celni pohled.jpg
    - └─ pohled shora.jpg
    - └─ slozene sestaveni.jpg
    - └─ zadni pohled.jpg
    - └─ zakladni sestaveni.jpg
  - └─ schemata.....kompletní schémata zapojení funkčních bloků
    - └─ 00H.eps
    - └─ OVT.eps
    - └─ predzesilovac.eps
    - └─ stabilizator.eps
  - └─ simulace.....soubor pro simulaci OVT v programu LT Spice IV
    - └─ OVT+NPN smesovac.asc
  - └─ elektronická verze BP Theremin .. elektronická verze BP ve formátu pdf